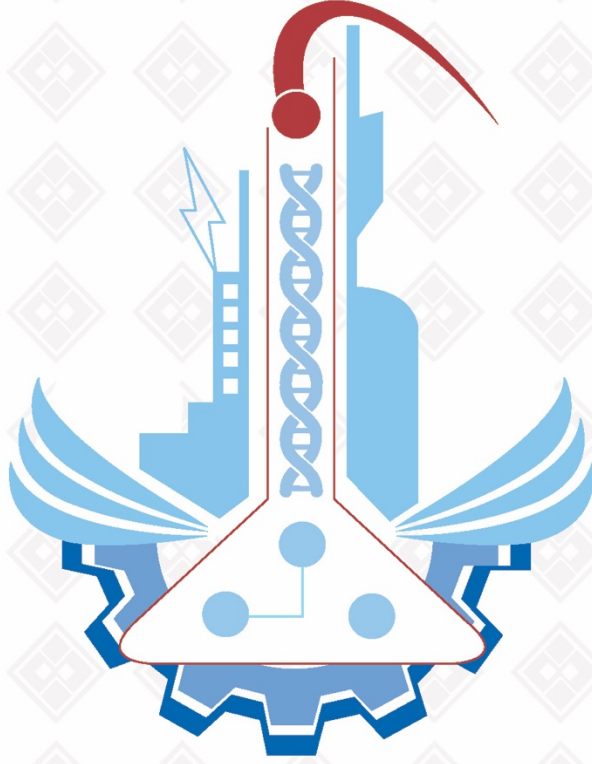


ISSN: 1308-9072

Cilt: 36 / Sayı: 1 / Yıl: 2024

# 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:36, Sayı:1, Yıl: 2024**  
**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](mailto:fenbilim@firat.edu.tr)

**Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.**

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

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



**Fırat Üniversitesi**  
**Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**

**Sahibi**

**Prof Dr. Fahrettin GÖKTAŞ**  
Fırat Üniversitesi Rektörü

**Genel Yayın Yönetmeni**

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

**Baş Editör**

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

**Editör**

**Doç. Dr. Mesut TOĞAÇAR**  
Fırat Üniversitesi İİBF Öğretim Üyesi

**DANIŞMA KURULU**

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



**Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)**  
**36-1, 2024**

**İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

1. **Barkod Tanıma İşlemlerinde SURF Metodunun Uygulanarak LabVIEW Tabanlı Raf Otomasyon Sisteminin Gerçeklenmesi**  
*Implementation of LabVIEW Based Shelf Automation System by Applying SURF Method in Barcode Recognition Processes*  
**Mehmet DEMİR, Gökhan ATALI, Durmuş KARAYEL, Raşit KÖKER** ..... 1-9
2. **Hasas Baba Türbesi'nin Fotogrametrik Rölöve Alımı ve Farklı Yazılımlarda Doğruluk Araştırması**  
*Photogrammetric Relief of Hasas Baba Tomb And Accuracy Research In Different Softwares*  
**Pelinsu YILDIRIM DEMİR, Aydan YAMAN** ..... 11-23
3. **Stock Price Forecasting Using Machine Learning and Deep Learning Algorithms: A Case Study for the Aviation Industry**  
*Makine Öğrenimi ve Derin Öğrenme Algoritmalarını Kullanarak Hisse Senedi Fiyat Tahmini: Havaacılık Sektörüne Yönelik Bir Örnek Çalışma*  
**Yunus Emre GÜR** ..... 25-34
4. **Mimarlık Öğrencilerinin Sanal Gerçeklik Ortamında Safranbolu Tabakhanesinde Rölöve Alma Deneyimi**  
*Building Surveying Experience of Architecture Students in Safranbolu Tannery using Virtual Reality*  
**Muhammed Yusuf KÜÇÜKKARA\*, Kasım ÖZACAR, Yasin ORTAKCI** ..... 35-47
5. **Investigation and Optimization of Biosorbent Capacities of Some Plants Used in Daily Life**  
*Günlük Hayatta Kullanılan Bazı Bitkilerin Biyosorbent Kapasitelerinin İncelenmesi ve Optimizasyonu*  
**Sibel ARSLAN, Nursah KÜTÜK** ..... 49-60
6. **Geleneksel Tahıl Kurutuculardaki Kanal Geometrisinin Kurutma Havası Akışına Etkisinin Gözenekli Ortam Yaklaşımıyla İncelenmesi**  
*Investigation of the Effect of Duct Geometry on Drying Air Flow in Conventional Grain Dryers by Porous Media Approach*  
**Merdin DANIŞMAZ** ..... 61-71
7. **Asker Dağı (Elazığ) Güneybatısında Yer Alan Mafik Volkanik Kayaçların Konfokal Raman Spektroskopisi ile İncelenmesi**  
*Investigation By Confocal Raman Spectroscopy of Mafic Volcanic Rocks in the Vicinity of North of Asker Mountain (Elazığ)*  
**Mutlu Ercan ÇELİK, Melek URAL** ..... 73-84
8. **AA7475-T7351 ve AA2219-T851 Alaşımalarının Frezelenmesinde Kesici Takım Kaplamalarının ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi**  
*Experimental Investigation of the Effect on Surface Roughness of Cutting Tool Coating and Cutting Parameters on CNC Milling of AA7475-T7351 and AA2219-T7351 Alloys*  
**Simge GENÇALP İRİZALP, Handenur KARAOĞLU, Yiğit ERÇAYHAN, Selda AKGÜN KAYRAL** ..... 85-95
9. **Dizel Motorlarda Benzin ve Atık Araç Lastiklerinden Elde Edilen Piroolitik Yağın Dizel Yakıt ile Karışımlarının Araştırılması**  
*An Investigation of Blends of Gasoline and Pyrolytic Oil Derived from Waste Vehicle Tires with Diesel Fuel in Diesel Engines*  
**Mesut UÇAR, Murat KOCAGÜL, Burak TANYERİ, Müjdat FIRAT** ..... 97-104

<b>10. Enerji Depolama ile Elektrik Dağıtım Şebekesinin İşletme Maliyeti Optimizasyonu</b> <i>Operating Cost Optimization of Electricity Distribution Network with Energy Storage</i> <b>Fatma AVLI FIRIŞ, İsrail KARADÖL, Ökkeş Fatih KEÇECİOĞLU .....</b>	<b>105-120</b>
<b>11. Güneş Enerjisi Santrallerinde YOLO Algoritmaları ile Hotspot Kusurlarının Tespiti</b> <i>Detection of Hotspot Defects in Solar Power Plants with YOLO Algorithms</i> <b>Sümeyye YANILMAZ, Muammer TÜRKÖĞLU, Muzaffer ASLAN .....</b>	<b>121-132</b>
<b>12. Bal Arı Hastalıklarının Sınıflandırılması için ConvMixer, VGG16 ve ResNet101 Tabanlı Topluluk Öğrenme Yaklaşımı</b> <i>ConvMixer, VGG16 and ResNet101 Based Ensemble Learning Approach for Classification of Honey Bee Diseases</i> <b>Mustafa ALTIN, Hüseyin ÜZEN, İpek BALIKÇI ÇİÇEK .....</b>	<b>133-145</b>
<b>13. Enhancing Structural Resilience: Exploring the Novel Sleeve Method for Steel T-Stub Connections</b> <i>Yapısal Dayanıklılığın Artırılması: Çelik T-Bağlantılar İçin Yeni Çelik Manşon Yöntemi</i> <b>Muhammed ATAR, Berat ÇETE .....</b>	<b>147-158</b>
<b>14. ResNet Tabanlı PSPNet Kullanarak Panoramik Görüntülerde Gömülü Diş Segmentasyon Analizi</b> <i>Impacted Tooth Segmentation Analysis in Panoramic Images Using ResNet Based PSPNet</i> <b>Meryem DURMUŞ, Burhan ERGEN, Adalet ÇELEBİ, Muammer TÜRKÖĞLU .....</b>	<b>159-166</b>
<b>15. A Statistical Assessment of Drinking Water Quality: A Case Study of Doburca Treatment Plant, Bursa</b> <i>İçme Suyu Kalitesinin İstatistiksel Olarak Değerlendirmesi: Bursa Doburca Arıtma Tesisi Örneği</i> <b>Damla YILMAZ, Egemen ARAS, Babak VAHEDDOOST .....</b>	<b>167-178</b>
<b>16. Bölgesel Su Kalitesi Araştırmaları için Arduino Tabanlı Bir Su Analizi Sistemi Prototipinin Tasarımı</b> <i>Design of an Arduino-Based Water Analysis System Prototype for Regional Water Quality Research</i> <b>Ebru KARAKÖSE, Mehmet Ali IŞIK .....</b>	<b>179-191</b>
<b>17. Deprem Yıkıntı Atıkları ve Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Atık Betonların Taze Beton Özelliklerini Tahmin Eden Sayısal Model Geliştirilmesi</b> <i>Development of Numerical Model to Predict Fresh Concrete Properties of Waste Concrete Produced Using Earthquake Demolition Wastes and Fly Ash</i> <b>Muhammed ULUCAN .....</b>	<b>193-199</b>
<b>18. Zemine Entegre Piezoelektrik Sensörden Enerji Hasadı</b> <i>Energy Harvesting From Floor Integrated Piezoelectric Sensor</i> <b>Biröl ÇAVUŞ, Sibel AKKAYA OY .....</b>	<b>201-210</b>
<b>19. Çinko Ekstraksiyon Artığından Korozyon Önleyici (Antikoroziv) Endüstriyel Çinko Kromat Kompleks Çözeltisi Üretimi</b> <i>Production of Anti-Corrosive Industrial Zinc Chromate Complex Solution from Zinc Extraction Residue</i> <b>Zeynel Abidin SARI, M. Deniz TURAN .....</b>	<b>211-220</b>
<b>20. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrasında Betonarme Kolonlarda Enine Donatı Kusurlarının İncelenmesi</b> <i>Investigation of Transverse Reinforcement Defects in Reinforced Concrete Columns After the 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes</i> <b>Muhammed ATAR, Ozan İNCE, Ömer Faruk TAŞ, Alper ÖZMEN, Erkut SAYIN .....</b>	<b>221-230</b>



<b>21. Sakkarozun Enzimatik Olarak Hidrolizinin Optimizasyonu</b> <i>Optimization of Enzymatic Hydrolysis of Sucrose</i> Abdulkadir GÜL, Muhammet TANYILDIZI .....	231-243
<b>22. Ti50Ni27Nb20Ta3 Şekil Hatırlamalı Alaşımında Isıl İşlemlerin Faz Dönüşüm Histeresizi ve Termal Aktivasyon Enerjisi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi</b> <i>Investigation of The Effects of Heat Treatments on Phase Transformation Hysteresis and Thermal Activation Energy in Ti50Ni27Nb20Ta3 Shape Memory Alloy</i> Esra BALCI, Fethi DAGDELEN .....	245-253
<b>23. Investigation of Urban Transformation Process, Methods, and Techniques: Elazig Province Sample</b> <i>Kentsel Dönüşüm Süreci, Yöntem ve Tekniklerin İncelenmesi: Elazığ İli Örnekleme</i> Belkıs ELYİĞİT, Cevdet Emin EKİNCİ .....	255-266
<b>24. Çift Doğrusal CNN Kullanarak Çelik Yüzey Kusurlarının Sınıflandırılması</b> <i>Classification of Steel Surface Defects Using Bilinear CNN</i> Emre GÜÇLÜ, İlhan AYDIN, Erhan AKIN .....	267-280
<b>25. Derin Sıfırlatı Isıl İşlemin Bimetallerin Bazı Mekanik Özelliklerine Etkisi</b> <i>Effect of Deep Cryogenic Heat Treatment to Some Mechanical Properties of Bimetals</i> Zafer ÖZDEMİR.....	281-289
<b>26. Evrişimsel Sinir Ağları Kullanarak ÇKA Sınıflandırıcısı ile Mide Displazisinin Tespiti</b> <i>Detection of Stomach Dysplasia by MLP Classifier using Conventional Neural Networks</i> Seda SAGIROĞLU, Seda ARSLAN TUNCER, Birgül KARAHAN, İbrahim Hanifi ÖZERCAN .....	291-300
<b>27. Evaluation of Academic Self-Efficiency, Community Feeling, and Academic Achievement of Students in the Process of the Covid-19 Pandemic by Data Mining Techniques</b> <i>Covid-19 Pandemisi Sürecinde Öğrencilerin Akademik Öz Yeterlilik, Topluluk Hissi ve Akademik Başarılarının Veri Madenciliği Teknikleri ile Değerlendirilmesi</i> Songül KARABATAK, Özal YILDIRIM, Murat KARABATAK .....	301-310
<b>28. Tek Katmanlı Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Yapısal Performansının İncelenmesi</b> <i>Evaluation of Structural Performance of Single Layer Steel Space Lattice Dome Systems</i> Mehmet Sedat Hayalioğlu, Mehmet Ali BEKTAŞ .....	311-339
<b>29. Mansap Pürüzlülüğünün Toprak Dolgu Barajın Üstten Aşma ile Yıkılması Durumunda Taşkın Dalgası ve Sediment Yayılımına Etkisinin Deneysel olarak İncelenmesi</b> <i>Experimental Investigation of the Effect of Downstream Roughness on Flood Wave and Sediment Propagation in case of an Earth-Fill Dam Break by Overtopping</i> Zehra BÜYÜKER, Ebru TAŞKAYA, Gökçen BOMBAR, Gökmen TAYFUR .....	341-356
<b>30. Acoustic Evaluation of Trabzon Beşirli Central Tennis Court Multi-Purpose Hall</b> <i>Trabzon Beşirli Merkez Tenis Kortu Çok Amaçlı Salonunun Akustik Değerlendirmesi</i> Ayşegül KANDEMİR, Mustafa KAVRAZ .....	357-367
<b>31. Mikro İşlemciler için Sıvı Metal Soğutmalı Mini Kanallı Soğutucularda Kanatçık Kullanımının Termohidrolik Etkilerinin İncelenmesi</b> <i>Investigation of the Thermohydraulic Effects of Using Fin in Liquid Metal Cooled Mini-channel Heat Sinks for Microprocessors</i> Orhan KALKAN .....	369-381

32. **Autonomous Vehicle Technology and Technology Acceptance: The Role of Technological Readiness on Consumers' Attitudes Towards Driverless Cars and Intention to Use in the Future**  
*Hybrid Otonom Araç Teknolojisi ve Teknoloji Kabulü: Tüketicilerin Sürücüsüz Araçlara Yönelik Tutumları ve Gelecekte Kullanım Niyeti Üzerinde Teknolojik Hazırlığın Rolü*  
**Fatih BİLİCİ, İ. Kürşad TÜRKÖĞLU** ..... 383-407
33. **Effects of Porosity and Boron Reinforcement in AISI 316L Stainless Steel for Biomedical Applications**  
*Biyomedikal Uygulamalarda AISI 316L Paslanmaz Çelik için Gözeneklilik ve Bor Takviyesinin Etkileri*  
**Bünyamin AKSAKAL, Naim ASLAN, Ferzan FİDAN** ..... 409-418
34. **Tip-3 Bulanık Mantık ile Düşüş Kontrollü İnverter Tabanlı Mikro Şebekelerin İkincil Gerilim ve Frekans Restorasyon Kontrolü**  
*Type-3 Fuzzy Based Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Inverter Based Microgrids with Droop Control*  
**Muhammed Serhat DÜZDAĞ, Heybet KILIÇ, Cem HAYDAROĞLU**..... 419-435
35. **Design, Fabrication and Performance Analysis of a Portable, Antenna Analyzer Based, Quartz Crystal Microbalance Measuring System with Energy Dissipation**  
*Enerji Yitimi Ölçebilen Taşınabilir Anten Analizörü Tabanlı Kuvars Kristal Mikroterazi Ölçüm Sisteminin Tasarımı, Üretimi ve Performans Analizi*  
**Ceyhan Ekrem Kırımli** ..... 437-445
36. **Kriyojenik İşlem Uygulanan Elektro Erozyon Elektrot Takımının Performansının Araştırılması**  
*Cryogenic Heat Treatment of Electro Discharge Machining Electrode Tooling Investigation of Performance*  
**Mustafa AY, Savaş APAK** ..... 447-458
37. **Modeling Longitudinal Evolution of Decommissioned Geostationary Satellites using Neural Networks**  
*Ömrünü Tamamlamış Yer Sabit Uyduların Boylam Hareketlerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi*  
**İbrahim ÖZ, Cevat ÖZARPA** ..... 459-470
38. **Farklı Polimerlerle Modifiye Edilmiş Asfalt Bağlayıcıların MSCR Testi Kullanarak Yüksek Sıcaklık Performanslarının Değerlendirilmesi**  
*Evaluation of High Temperature Performance of Asphalt Binders Modified with Different Polymers Using MSCR Test*  
**Erkut YALÇIN, Mehmet YILMAZ** ..... 471-479
39. **Anomaly Detection in Meteorological Data Using a Hierarchical Temporal Memory Model: A Study on the Case of Kazakhstan**  
*Hiyerarşik Zamansal Bellek Modeli ile Meteorolojik Verilerdeki Anomalilerin Tespiti: Kazakistan Örneği Üzerine Bir Çalışma*  
**Kürşat Mustafa KARAOĞLAN, Oğuz FINDIK, Erdal BAŞARAN** ..... 481-498
40. **Cilt Kanseri Görüntüleri Kullanılarak Eğitilen EfficientNet-B3 Mimarisinde Hiperparametre Seçiminin Sınıflandırma Performansına Etkisinin İncelenmesi**  
*Investigation of the Effect of Hyperparameter Selection on Classification Performance in EfficientNet-B3 Architecture Trained Using Skin Cancer Images*  
**Ahmet Bahadır KARLI, Buket KAYA** ..... 499-507

**41. Türkçe Metinlerde Duygu Analizi: Derin Öğrenme Yaklaşımlarının ve Ön İşlem Süreçlerinin Model Performansına Etkisi**

*Sentiment Analysis in Turkish Texts: The Effect of Deep Learning Approaches and Preprocessing Processes on Model Performance*

**Yasin GÖRMEZ1, Halil ARSLAN, Bilal ATAK .....**

**509-520**





## Barkod Tanıma İşlemlerinde SURF Metodunun Uygulanarak LabVIEW Tabanlı Raf Otomasyon Sisteminin Gerçeklenmesi

Mehmet DEMİR<sup>1\*</sup>, Gökhan ATALI<sup>2</sup>, Durmuş KARAYEL<sup>3</sup>, Raşit KÖKER<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Mekatronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

<sup>4</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

\*1 mehmetdemir125@hotmail.com, <sup>2</sup>gatali@subu.edu.tr, <sup>3</sup>dkarayel@subu.edu.tr, <sup>4</sup>rkoker@subu.edu.tr

(Geliş/Received: 10/05/2023;

Kabul/Accepted: 06/10/2023)

**Öz:** Bu çalışma kapsamında günümüzde ortaya çıkan kargolama sistemlerindeki yoğunluklar araştırılarak bu sistemlerin daha hızlı çalışması gerektiği düşünülmüş ve gerçek zamanlı çalışabilen denetlenebilir bir otomasyon sistemi tasarlanmaya çalışılmıştır. Bu kapsamda bilgisayar görmesi ile LabVIEW tabanlı çalışabilen kartezyen robot otomasyonunun gerçek zamanlı geliştirilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen nesne tanıma sisteminde OpenCV tabanlı çalışan SURF metodu kullanılarak ürünlerin barkodları algılama ve tanıma işlemlerini daha hızlı yapması sağlanmıştır. Hızlı bir şekilde yapılan tanımlama işlemlerinin ardından elde edilen bilgiler LabVIEW otomasyonuna aktarılarak ürün gerçek zamanlı olarak tasarlanmış mini raf alanlarına 3 boyutlu kartezyen robot yardımıyla yerleştirilmiştir. Aynı zamanda ürün yerleştirilme aşamasında gerçek zamanlı olarak otomasyon sisteminde bulunan sensorlerden gelen bilgiler ve motor konum bilgileri alınarak LabVIEW grafik ara yüzüne aktarılmıştır. Bu bilgiler gerçek zamanlı olarak denetlenebilir hale getirilerek otomasyon ekranında izlenebilir bir sistem oluşturulmuştur. Bu sistemlerin geliştirilmesi ile endüstri 4.0 ve zeki sistemlerin oluşmasına ortam hazırlayacağı zamandan ve iş gücünden kazanç sağlanacağı anlaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Bilgisayar Görmesi, OpenCV- SURF, Barkod, LabVIEW, Kartezyen Robot

### Implementation of LabVIEW Based Shelf Automation System by Applying SURF Method in Barcode Recognition Processes

**Abstract:** Within the scope of this study, it was thought that these systems should work faster by investigating the densities in the shipping systems that emerged today and an auditable automation system that could work in real time was tried to be designed. In this context, real-time development of Cartesian robot automation, which can work on the basis of LabVIEW with computer vision, has been provided. In the developed object recognition system, using the OpenCV-based SURF method, products are enabled to detect and recognize barcodes faster. After the quick identification processes, the obtained information was transferred to LabVIEW automation and the product was placed in the mini shelf areas designed in real time with the help of a 3D cartesian robot. At the same time, information from the sensors in the automation system and motor position information were received in real time during the product placement stage and transferred to the LabVIEW graphic interface. By making this information controllable in real time, a traceable system was created on the automation screen. It has been understood that the development of these systems will provide an environment for the formation of industry 4.0 and intelligent systems, and gain from time and workforce.

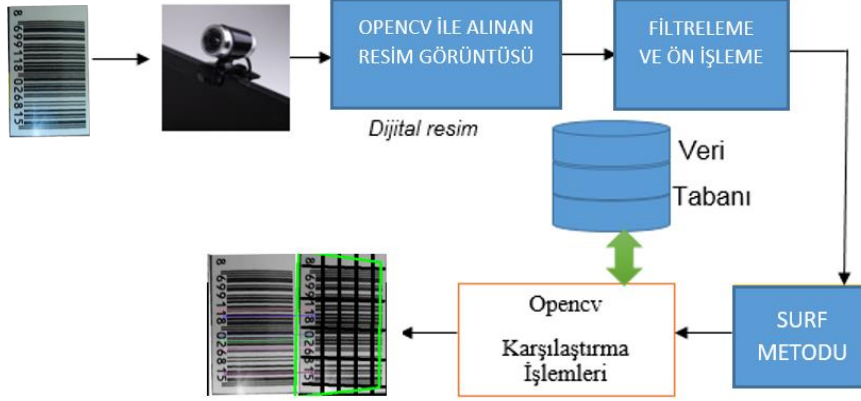
**Key words:** Computer Vision, OpenCV- SURF, Barkode, LabVIEW, Cartesian Robot

#### 1. Giriş

Bilgisayarlı görme gün geçtikçe toplum içinde kendini gösterebilmektedir. Bilgisayar görmesine duyulan ihtiyaçların başlıca kaynakları sanal gerçeklik ortamlarının oluşturulma ihtiyacıdır [1]. Bilgisayarlı görme ilk durumlarda capture kartları ile sağlanırken zamanla TV kartları kullanılarak görüntüler iki boyutlu sinyallere dönüştürülüp matris biçiminde bilgisayar ortamına alınıp görüntüler üzerinde çalışmalar yapılabilmektedir. Teknolojinin ilerlemesi ile bilgisayar görmesi uygulamaları ise hızla gelişmiştir. Gelişmelerdeki en önemli durumlardan biri de insan ihtiyaçlarından doğmaktadır. Nüfusun hızla artması buna örnek olabilmektedir. Artan nüfusta insan ihtiyaçlarının karşılanabilmesi ve sorunların ortadan kaldırılabilmesi için bilgisayarlı sistemler geliştirilmektedir [1,2]. Bilgisayarlı görme insan hayatına girdiğinden bu yana birçok soruna çözüm bulmaktadır. Bunlar yüz, parmak izi, imza, iris, retina ve insan algılama veya tanıma vb. birçok işlemlerde kullanılmaktadır. Bilgisayarlı görme bu nedenlerden ötürü günümüzde kendine yeni bir boyut kazanmıştır [3]. Endüstriyel alanlarda

\* Sorumlu yazar: [mehmetdemir125@hotmail.com](mailto:mehmetdemir125@hotmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0009-0007-6105-3439, <sup>2</sup>0000-0003-1215-9249, <sup>3</sup>0000-0001-9326-466X, <sup>4</sup>0000-0002-3811-2310

kalite kontrol, ürün kontrol, sayıcı, tarayıcı, vb. işlemlerde bilgisayar görmesi sıkça kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında endüstriyel uygulamalardan biri olan barkod tanıma işlemi OpenCV kütüphanesinde aktif olarak kullanılan SURF metodu ile yapılmıştır.

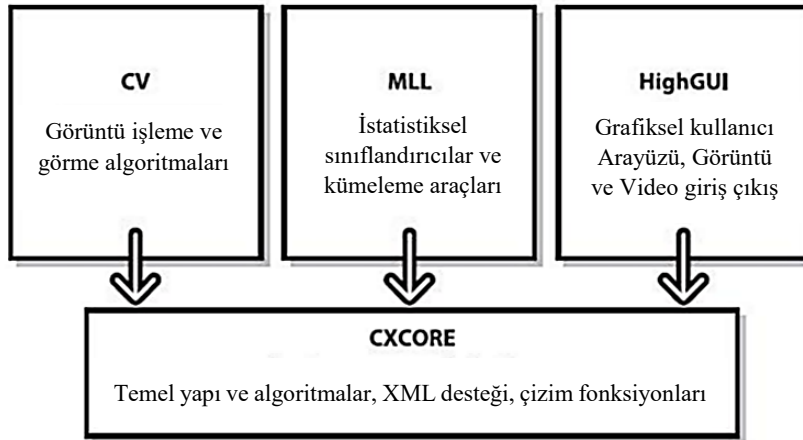


Şekil 1. Barkod Tanıma Sistemi

Barkod tanıma sistemi Şekil 1’de gösterildiği gibi OpenCV kütüphanelerinden biri olan SURF metodu temel bilgisayar görmesi işlemlerinin ardından veri tabanında bulunan barkod resimleri üzerinden tanımlanmıştır [4]. Tanıma tamamlandıktan sonra barkod bulunan ürünün mini olarak tasarlanan raf sistemindeki yerine iletilmesi için 3 boyutlu kartezyen bir taşıyıcı geliştirilerek LabVIEW tabanlı raf düzenleme yazılımına gerçek zamanlı olarak aktarılması yapılmıştır. Genel bir sistem olarak ürün barkodundan algılanan bilgi ile hareket eden mini raf sistemi LabVIEW yazılımı ile gerçek zamanlı takip edilip ürünün raftaki yerine yerleştirilmesi yapılmıştır.

## 2. Bilgisayarlı Görme

Bilgisayarlı görme insan görme sisteminden esinlenerek tasarlanmıştır. Bilgisayarlı görme alanında günümüzde birçok donanım ve kütüphaneler tasarlanmıştır. Günümüzde aktif olarak en çok kullanılan görüntü işleme kütüphanesi OpenCV dir. OpenCV, bir resim ya da video içindeki anlamlı bilgileri çıkarıp işleyebilmek için INTEL tarafından C ve C++ dilleri ile yazılmış kütüphaneleri kullanılarak geliştirilmiş, açık kaynak kodlu bir “Bilgisayarla Görü” kütüphanesidir [5]. OpenCV kütüphanesi açık kaynaklı olmasından dolayı birçok platform için kullanılabilir bir görüntü işleme kütüphanesidir. OpenCV kütüphanesinin temel bileşenleri Şekil 2’ de gösterildiği gibidir [6]. Bu çalışmada OpenCV kütüphanesi kullanarak barkod tanımda SURF metodu kullanılıp yapay sinir ağları ile kıyaslanacaktır.



Şekil 2. OpenCV Yapısı

Bunlara ek olarak OpenCV’de yüz tanıma, insan tanıma, plaka tanıma, nesne tanıma gibi işlemler için birçok algoritma geliştirilmiştir [5,6,7]. Intel tarafından geliştirilmiş olan OpenCV kütüphanesi gerçek zamanlı uygulamalarda hızlı ve başarılı sonuçlar vermektedir. Farklı bilgisayarlarda ve gömülü sistemlerde çalıştırılabilmesinden dolayı endüstride de kullanımı yaygınlaşmaktadır. Sistem tasarımlarında entegre edilebilmesinden dolayı birçok platformda kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında OpenCV kütüphanesi aracılığı ile barkod tanıma işlemi için Yapay Sinir Ağları(YSA) ve SURF metodu araştırılmıştır. YSA nesne tanıma işlemlerinde kullanılması için tanıma yapılacak cismin öznitelik vektörlerinin belirlenmesi, belirlenen özniteliklerin sayısallaştırılması, aynı ürün için bir çok örnek toplanması, bu verilerin her bir örnek için ayrıca çıktı oluşturulması, her bir örnek için öznitelik değerlerinin ve çıktı değerlerinin MATLAB gibi YSA eğitme işlemi için harici bir yazılıma ihtiyaç duyması, eğitme işlemi sırasında YSA modelinin, girdi ve çıktı katmanının, aktivasyon fonksiyonunun, epoch sayısının belirlenmesi, hata değerlerinin optimum düzeyde tutulması ile elde edilen bias değerlerinin aktivasyon fonksiyonuna göre yazılım içerisine gömülmesi veya örnek alınan ortamın fiziki durumlarının sabit ve ışık düzeyinin yüksek olması gibi birçok etkene bağlı olarak tanıma işleminin gerçekleştirilmesi [8] durumunda zorluklar yaşanması nedeniyle SURF metodu incelenerek veri tabanındaki görsel üzerinden tanıma ve algılamaya yapabildiği görülmüş bu sebeple SURF dedektör yapılarının anlaşılması için ayrıntılı çalışma yapılmıştır.

## 2.1. SURF metodu

SURF yöntemi de çeşitli görme tabanlı uygulamalar için geliştirilmiş bir özellik dedektörüdür. Resimlerin önemli noktalarının karşılaştırılması işlemi için kullanılır [9]. Bu karşılaştırma üç adımdan meydana gelir. Öncelikle resmin içerisinde belirgin bölgelerdeki önemli noktalar köşeler, lekeler, birleşim noktaları seçilir. Önemli noktalar olarak tabir edilen noktaların en değerli özelliği onun tekrarlanabilirliğidir. Tekrarlanabilirlik, farklı görüntüleme koşulları altında aynı önemli noktaları bulmak için bir dedektör güvenilirliğini ifade eder. İkinci adım olarak her bir önemli noktanın komşuluğu bir özellik vektörü olarak temsil edilir. Bu tanımlayıcı, foto grafik ve geometrik deformasyonları, önemli nokta yer değişimlerini ve resimdeki gürültüleri bastırarak kadar güçlü ve ayırt edici olmak zorundadır. Son olarak farklı resimler içerisinde bulunan özellik vektörleri karşılaştırılır. Bu karşılaştırma vektörler arasındaki mesafeyi temel alır. SURF metodu bu işlemleri hızlı bir şekilde yapmasının altında matematiksel birçok işlem vardır [10]. Bu işlemlere değinecek olursak; SURF matematiksel olarak 2 boyutlu haar dalgacıklarının yanıtlarının toplamına dayanan bir işlemler bütünüdür. SURF bu işlemleri kısa sürelerde gerçekleştirmek amacıyla görüntülerin integral halleri ile işlem yapar. Bu işlemler dikdörtgen alanlarla yapıldığından işlemlerin çok kısa sürelerde gerçekleşmesini sağlar.  $I = (x, y)$  Koordinatlarındaki  $I_{\Sigma}(x)$  görüntüsü nokta ve merkezci bir nokta içerisinde kalan dikdörtgen alanının toplamına dayanmaktadır.

$$I_{\Sigma}(x) = \sum_{i=0}^{i \leq x} \sum_{j=0}^{j \leq y} I(i, j) \quad (1)$$

Denklem (1) elde edilir edilmez alan üzerindeki yoğunlukların hesaplanması için uygulanması gereken işlemler SURF tanımlayıcı dedektörleridir. Bu dedektörleri elde etmek için Hessian matrisleri kullanılır. Hessian matrislerinin determinantının maksimum olduğu an görüntü matrislerinin elde edildiği matristir. Denklem (2)’deki hessian matrisi oluşturulmuştur [10].

$$H(I(x, y)) = \begin{bmatrix} \frac{d^2 I}{dx^2} & \frac{d^2 I}{dy dx} \\ \frac{d^2 I}{dx dy} & \frac{d^2 I}{dy^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Hessian matrisi oluşturulduktan sonra determinant işlemi denklem (3)’ deki gibi yapılır. Determinant işlemlerinin yapılması konum ve ölçek sorunlarının oluşmasına engellemek içindir

$$\det(H(I(x, y))) = \frac{d^2 I}{dx^2} \frac{d^2 I}{dy^2} - \left( \frac{d^2 I}{dx dy} \right)^2 \quad (3)$$

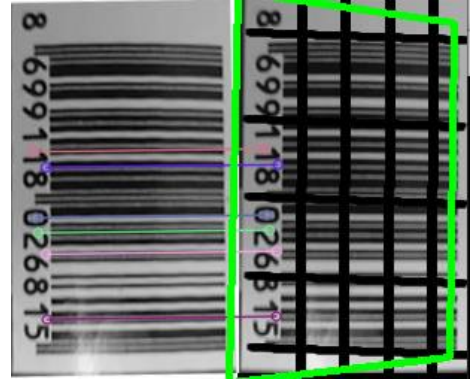
Determinant işleminden sonra uygulanacak olan işlemse determinantı alınan matrisin ikinci dereceden türevi alınarak maksimum ve minimum noktalarının elde edilmesi ile olur. Bu işlem de denklem (4) de verilmiştir. İşlemlerin gerçekleşmesinde Gaussian işlemleri gerekli durumlarda (yumuşatma, azaltma) kullanılmıştır. Verilen bu denklem elde edilen bölgenin matris değerlerinin elde edilmiş halidir [10].

$$H(P, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(P, \sigma) & L_{xy}(P, \sigma) \\ L_{xy}(P, \sigma) & L_{yy}(P, \sigma) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu aşamadan sonra ölçek uzayın oluşturulması, ilgi noktası yerleştirilmesi ve yerleştirilen noktaların eşleştirme işlemleri yapılarak tanıma ve algılama işlemleri gerçekleştirilmiş olunur. Bu proje kapsamında SURF metodu proje kapsamında barkodların algılanma ve tanıma işlemlerinde uygun bulunmuştur. Performansın artırılması ve problemin çözümünde vermiş olduğu değerler proje çalışması için uygun değerler ürettiğinden uygulamaya alınmıştır. Bu çalışma kapsamında SURF metodu aynı barkod üzerinde denenmiş ve doğru sonuçların çıkartımı yapılmaya çalışılmıştır. Birçok farklı barkod ve ölçkleme üzerlerinde deneme işlemleri gerçek zamanlı uygulanarak doğruluk oranları maksimum ve minimum olarak hesaplanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3. Barkod SURF Metodu Tanıma



Şekil 4. Barkod Engel Durumunda Tanıma

Bilgisayar ortamına web kamera aracılığı ile Visual Studio ortamında C++ programlama dili ile alınan barkod görüntüsüne OpenCV kütüphanesinin ön işleme teknikleri uygulanmıştır. Bu uygulama işleminden sonra SURF metodu kullanılarak bir bilgisayar görme uygulaması geliştirilmiştir. Şekil 3'te gösterildiği gibi verilen maksimum ve minimum doğruluk oranları elde edilmiştir. Barkod üzerine getirilen engel durumu ile algılama ve tanıma durumunda minimum doğruluk oranının düştüğü (%99.62) maksimum doğruluk oranının arttığı (%99.996) görülmüştür. SURF metodu önemli gördüğü noktaları, kenarları, köşeleri ve leke durumlarını kullandığından algılama ve tanıma işlemlerinde üstünlük sağlamaktadır. Bu metod resim eşleştirmeden çok farklıdır. Kenar, köşe, nokta ve leke belirlemede matematiksel yöntemlerle çalıştığından tanımlama işleminde hata payı azalmaktadır. SURF metodu vektörler arası mesafe yöntemiyle işlem yapması nedeniyle öğrenme metodlarına göre hızlı adapte edilebilmekte ve hata oranı az sonuçlar geliştirilebilmektedir. Azalan hata payını görüntü işleme metodlarında OpenCV kütüphanesinin gelişmiş fonksiyonlarını kullanarak daha da azaltmak mümkün olmuştur.

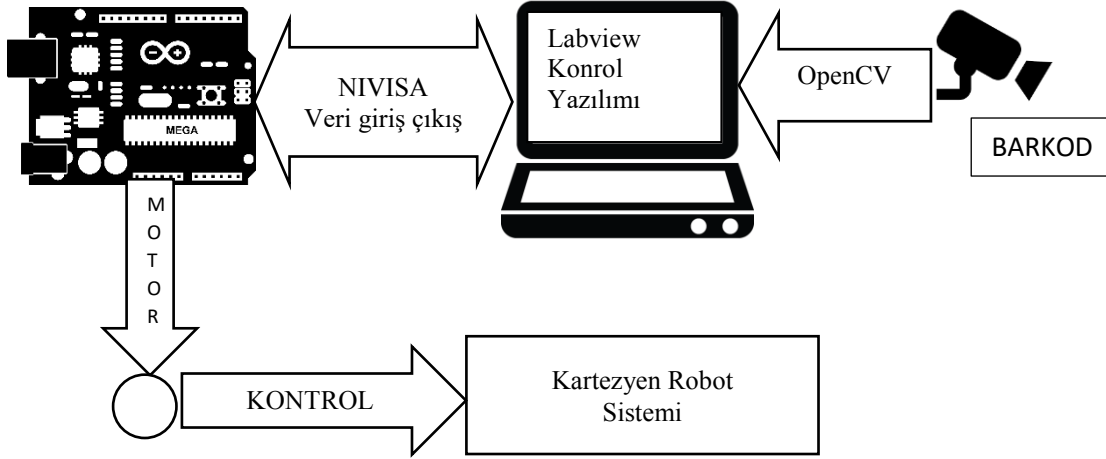
OpenCV'nin kullanıcılara sunduğu filtreleme ve eşikleme gibi ön işleme fonksiyonları aracılığı ile SURF metodu kullanılarak algılama ile tanıma işlemlerinde hata oranlarını en aza indirmek mümkün olduğundan bu fonksiyonlar kullanılmıştır. Şekil 4'te gösterildiği gibi verilen engel konumlandırılmış görselde belirtilen metod da tanımla işlemi minimum doğruluk oranının düştüğü (%99.40) maksimum doğruluk oranının arttığı (%99.999) anlaşılmıştır. Buna rağmen Şekil 4'te gösterildiği gibi engel durumunda SURF metodunun maksimum doğruluk oranında tanıma ve algılama yaptığı anlaşılmıştır. Bu nedenle tanımlanan barkod ile uyumlu raf sistemine iletişim kurmak için sayısal kod üretilerek serial port üzerinden LabVIEW ile iletişim kurulması sağlanmıştır [10,11,12].

### 3. Sistemin Genel Yapısı

LabVIEW, Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench kelimelerinin kısaltılmasından elde edilen bir isimdir ve kullanıcılara bir programlama ortamını sunmaktadır. LabVIEW; C, C++ veya Java gibi geleneksel dillerden farklıdır, National Instruments firması tarafından geliştirilmekte olan bir grafiksel programlama dilidir. LabVIEW uygulamaları Windows, Mac OSX veya Linux işletim sistemleri altında çalışmaktadır [13,14]. LabVIEW ile Microsoft Pocket PC, Microsoft Windows CE, Palm OS gibi platformlarda ve Field Programmable Gate Arrays (FPGAs), Digital Signal Processors (DSPs) ve mikro işlemciler gibi değişik gömülü platformları içeren sistemlerde gerçek zamanlı çalışabilen programlar yapılabilir [13,14,15]. Bu çalışma kapsamında LabVIEW

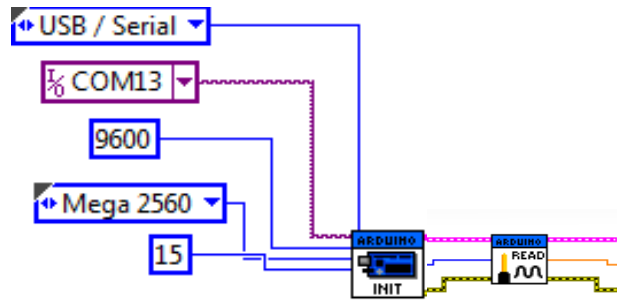


kullanılmasındaki en önemli nedenlerden biri de gerçek zamanlı çalışmalarda birçok girdi ve çıktılara olanak sağlamasıdır. Ayrıca LabVIEW görsel arayüz oluşturmada gelişmiş bir yazılım türüdür. Gerçek zamanlı olarak çalışmasından ve gerekli yazılımların görsel arayüzlerden kontrolünün anlık olarak sağlanmasından dolayı uygun görülmüş ve uygulanmıştır. Uygulama aşamasında LabVIEW gömülü sistemler ile haberleşmesinde oluşturulan protokoller (NIVISA, LINX) kolaylık sağlaması proje sonuçlarının oluşmasında olanak sağlamıştır. Bu nedenle kontrol edilecek mekanik sistem olarak tasarlanan 3 eksen kartezyen bir robot ile elektronik sistemler motor sürücü devreleri için LabVIEW tabanlı çalışan bir mikro kontrol kartından oluşmaktadır.



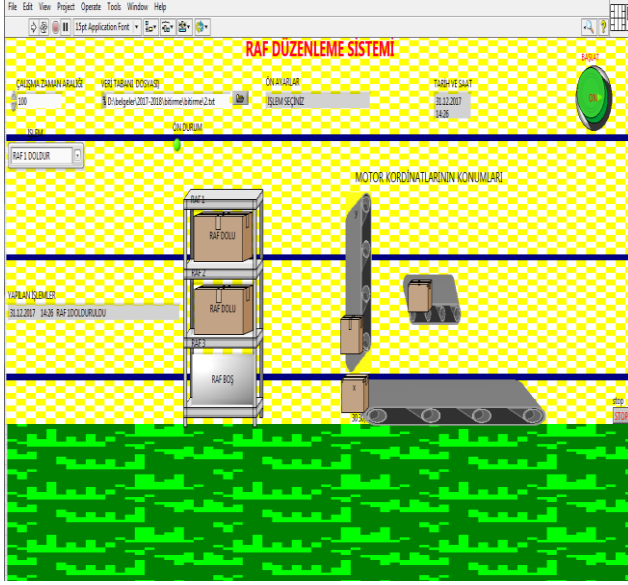
Şekil 5. Sistemin Genel Yapısı

Bu çalışma kapsamında OpenCV kütüphanesi ve SURF metodu aracılığı ile elde edilen bilgi LabVIEW yazılımı kullanılarak raf düzenleme sisteminin gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Şekil 5'te gösterildiği gibi sistemde LabVIEW yazılımı ile eş zamanlı çalışabilen Visual Studio ortamında geliştirilmiş bilgisayar görmesi tabanlı barkod tanıma sistemi bulunmaktadır. Barkod tanıma sisteminde SURF metodu kullanılarak algılama ve tanıma hızlı bir şekilde yapılmıştır. Algılama ve tanıma işlemleri gerçek zamanlı olarak çalıştırılmış, doğruluk oranlarına göre LabVIEW yazılımının kullanmadığı serial port kullanılarak çıktı oluşturulmuştur. Bu işlem sonucunda çıktı olarak LabVIEW yazılımının kullandığı arduino mega (mikro kontrol kartı) DAQ kartı girdi birimi olarak ana kontrol yazılımı içerisinde işlem yapılmıştır. Raf sistemi için önceden tanımlanan sayısal kod LabVIEW yazılımı içerisinde anlamlı bir analog bilgiye dönüştürülerek girdi fonksiyonu oluşturulup blok diyagramı için kullanılmıştır [13,14,15].

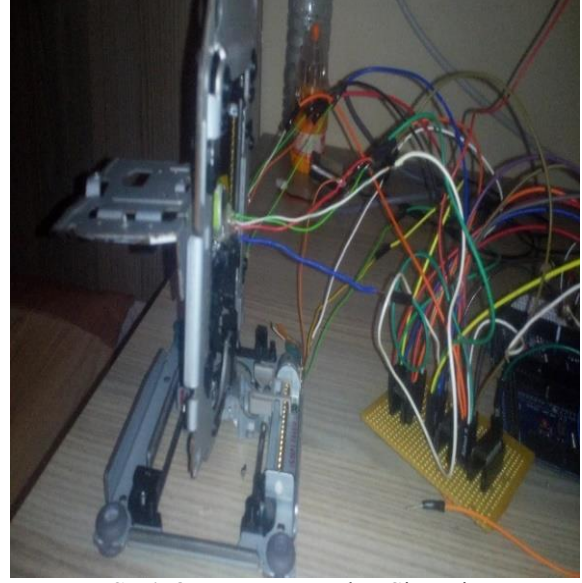


Şekil 6. LabVIEW Yazılımı Blok Diyagram Yapısı

Visual Studio ortamından gönderilen barkod bilgisi LabVIEW ortamına analog olarak aktarılmış ve bu aktarılan bilgi LabVIEW yazılımı aracılığı ile Şekil 6'da gösterildiği gibi işlem birimi seçimi için kullanılmıştır. Seçim işlemi tamamlandıktan sonra LabVIEW daq kartı(arduino mega) ile NI VISA protokolleri kullanılarak libabase yazılımı aracılığı ile haberleşmesi sağlanmıştır [16]. Haberleşme işlemleri sağlandıktan sonra gerekli timerlar kullanılarak kartezyen robot sistemindeki motor sürücülerinin gerekli pwm sinyalleri oluşturulmuştur. 3 boyutlu kartezyen robot arabaların belirlenen koordinatlara gitmesi sağlanmıştır. Arabanın belirlenen koordinatlara gitmesi sonucunda raf sistemine yerleştirilmesi gereken ürünler yerleştirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 7. LabVIEW Arayüz Tasarımı



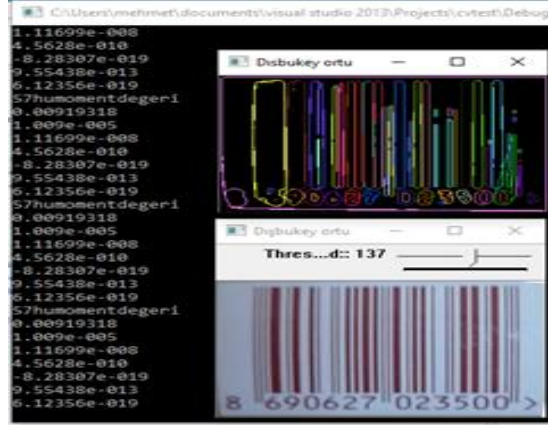
Şekil 8. Kartezyen Robot Sistemi

Ürün yerleştirme işlemleri için LabVIEW arayüz tasarımı hem görsel tasarım dikkate alınarak planlanmış hem de kartezyen robot kontrolü için acil müdahale edilmesi adına güvenlik fonksiyonları eklenmiştir. Şekil 7’de gösterildiği gibi LabVIEW arayüz tasarımı verilmiştir. Tasarım içerisinde raf düzenleme işlemleri anlık olarak görülebildiği gibi yapılan işlemler ayrıca görev tamamlama bilgisi için ayrıca raporlanmaktadır. LabVIEW Ara yüz üzerinde Başla butonu aktif edildiğinde Şekil 8’de gösterildiği gibi görsel ara yüzü verilen 3 boyutlu kartezyen robot sisteminin motor sürücü devreleri başlangıç konumunda bulunmaktadır. Bu aşamada konumlanan motorlar barkod okuma işleminin gerçekleştirilmesini beklemekte okuma işlemi gerçekleştiğinde gelen anlamlı bilgiyi doğrularak raf sisteminde ilgili alanın boş veya dolu olup olmadığını anlayarak kullanıcıya bilgi göndermekte bu durumlara göre işlem yürütmektedir. İşlem komut bilgisi doldurma veya boşaltma olarak belirlenmiştir. Doldurma bilgisi geldiğinde rafta boş olan kısımlara 3 boyutlu kartezyen robot, motor sürücüleri aracılığıyla arabalar hareket ettirilip raf sisteminde boş olan kısmın doldurulması sağlanmakta ve bu durumlar anlık olarak görsel arayüzden takip edilebilmektedir. Kullanıcı hatalı bir komut istemi gönderdiğinde kullanıcıya geri bildirim yapılarak düzenlemesi istenmektedir. Raf düzenleme işlemi anlık olarak takip edilebilmektedir.

#### 4. Sonuçlar ve Karşılaştırmalar

##### 4.1. Barkod tanıma sistemi

Bu çalışma kapsamında bilgisayar ortamına web kamera aracılığı ile alınan barkod görüntüsü OpenCV Kütüphanesi SURF metodu kullanılarak Visual Studio ortamında C++ programlama dili ile bir bilgisayar görme uygulaması geliştirilerek Şekil 3’te gösterildiği gibi de verilen barkod görüntüleri üzerinde tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. OpenCV Kütüphanesi ile SURF metodunun avantajları kullanılarak görseller üzerinde herhangi bir engel durumunda barkodların kısmi olarak algılanması ve tanınması durumunda % 99 oranında doğruluk ile gerçekleştirdiği anlaşılmıştır. Bu sebeple YSA ile kıyaslanması amacıyla sayısal öznetelik değerleri Şekil 9’da gösterildiği gibi verilmiştir. Bu değerler her bir barkod için ayrı ayrı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu değerler MATLAB ortamına alınarak YSA için topolojisi oluşturularak eğitilmiş eğitim bilgileri Tablo 1’de gösterildiği gibi ayrıntılı olarak verilmiştir.

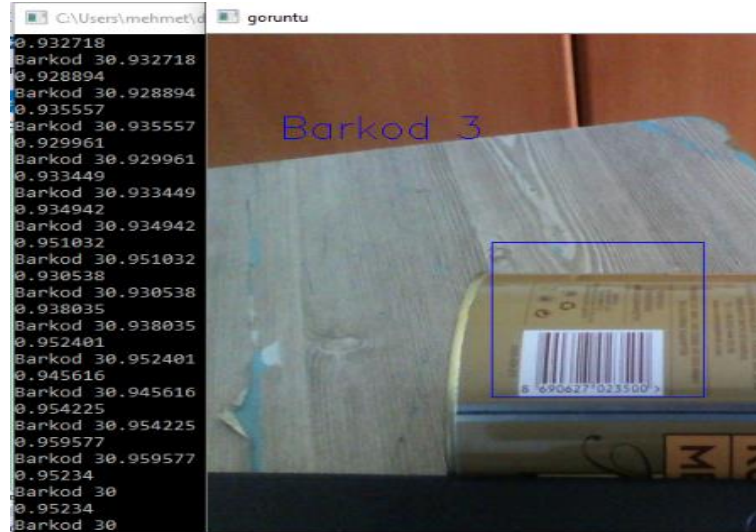


Şekil 9. Barkod Hu Moment değerleri

Tablo 1. YSA MATLAB Eğitim Bilgileri

Girdi katmanındaki sinir hücresi sayısı	7
Çıktı katmanındaki sinir hücresi sayısı	6
Aktivasyon fonksiyonu	Tanjant sigmoid
Gizli katmandaki sinir hücresi sayısı	50
Gizli katmandaki sinir hücresi sayısı	[20-50]
Epok sayısı	15
Öğrenme setinde bulunan veri sayısı	420
Doğrulama setinde bulunan veri sayısı	20
Test setinde bulunan veri sayısı	180
Öğrenme seti için elde edilen MSE hata değerleri	0.00841446
Doğrulama seti için elde edilen MSE hata değerleri	0.0229882
Test seti için elde edilen MSE hata değerleri	0.0164130

MATLAB ortamında Tablo 1'de gösterildiği gibi elde edilen değerlerin tanımlamaları daha önce yapılan çalışmalardan ve edinilen tecrübelerden yararlanılarak en iyi değerlerin oluşturulması için denemeler yapılarak elde edilmiştir. Bu denemeler sonucunda elde edilen YSA eğitim performans değerleri Tablo 2'de gösterildiği gibi verilmiştir.



Şekil 10. Barkod gerçek zamanlı tanıma sonuçları

**Tablo 2.** YSA MATLAB Eğitim Performansları

Nesne	Öğrenme Performansı %	Test Performansı %
Barkod 1	96.9988	96.99985
Barkod 2	96.9981	96.9653
Barkod 3	96.9989	96.98986
Barkod 4	96.9871	93,64568
Barkod 5	96.9882	96,995
Barkod 6	96.9694	96.14305

Tablo 2’de gösterildiği gibi YSA elde edilen performans değerlerinden elde edilen bias ağırlıkları gerçek zamanlı yazılım içerisine gömülerek uygulama geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulamada Şekil 10’da gösterildiği gibi tanıma ve algılama işlemi doğru bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Fakat uygulama dış aydınlanma güneş ışığı gibi fiziki şartlardan etkilenmesi sebebiyle %93-95 arasında tanıma ve algılama gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu durum yaklaşık %5-7 oranında hataya neden olmaktadır. Ayrıca dış etkilerin artması bu oranın artmasına neden olduğu da unutulmamalıdır. YSA’nın %5-10 oranında hata oluşturması nedeniyle bu çalışma kapsamında SURF metodunda geliştirilen uygulama yazılımının %0-1 oranında hata ile daha hızlı sonuç üretmesi tercih sebebi olmuş daha güvenilir ve optimum çalışan bir sistem oluşturulması sağlanmıştır.

**Tablo 3.** Uygulama SURF Metodu ve Yapay Sinir Ağı Karşılaştırılması

Sno/Adı	Surf Metodu	Yapay Sinir Ağı
1	Veri tabanı vardır	Veri tabanı yoktur
2	Ön işleme gerektirir	Ön işleme gerektirir
3	Bilgi çıkarımında yazılıma ihtiyaç duymaz	Bilgi çıkarımında yazılıma ihtiyaç duyar (Hu mument)
4	Hessian matrisleri hesaplanır	Moment envaryant değerleri hesaplanır
5	Sabit yapılıdır	Değişken yapılıdır
6	Fiziki şartlardan az etkilenir %0-1	Fiziki şartlardan çok etkilenir %5-10
7	Hata payı azdır %0-1	Hata payı çoktur %5-10
8	Doğrudan sonuç üretir	Yazılıma entegre edilmesi gerekir

SURF metodunu gerçek zamanlı olarak sınırlandırılmış ortamda uygulanmış ve gerçek değerlerin oluşup oluşmadığı sorgulanmıştır. Web kamera aracılığı ile alınan gerçek zamanlı barkod görüntüsü OpenCV SURF metodu ile önceden tanımlanmış veri ile kıyaslanarak tanıma ve algılama işlemi yapmaktadır. Barkod görüntüsünün web kameradan alınmasından sonra OpenCV’nin ön görüntü işleme fonksiyonları kullanılarak görüntü gri seviyeye dönüştürülür. Doğruluk oranının artırılması amacıyla filtreleme işlemleri yapılır. Bu aşamadan sonra SURF metoduna önceden tanımlanmış barkod nokta, köşe ve kenar vb. bilinenler verilerek barkodun algılanması ve tanınması SURF algoritması ile yapılması sağlanır algılama ve tanıma SURF metodunda vektörel olarak sağlandığından algılama ve tanınmanın doğruluk oranları kolayca bulunabilmektedir. Bu oranlar dikkate alınarak OpenCV nin işlem yapabilmesi için vektörel değerler resim formatlarının matrislerine dönüştürülür bu aşamadan sonra OpenCV resim işleme ve karşılaştırma işlemleri kullanılarak tespit edilen barkod frame üzerinde gerçek zamanlı olarak çizdirilmeye çalışılmıştır. Algılama ve tanıma işlemlerinin ardından LabVIEW ortamına bu bilgiler sayısalan analog bilgiye dönüştürülerek iletimi sağlanmıştır. Analog olarak alınan bilgi LabVIEW ortamında işlenerek 3 boyutlu kartezyen robotların konumlandırılmasında kullanılmıştır. Konumlama işlemi anlamlandırılan bilginin motor sürücü devrelerine iletimi ile arabaların 3 ekseninde hareketi sonucu oluşmaktadır. Hareketler sonucunda barkod bilgisinden gelen bilgiye göre raflara ilgili kargolar yerleştirilmiştir. Yerleştirme işleminin haricinde raflarda bulunan ilgili kargoların boşaltılması sağlanmıştır. Bu işlemler gerçekleşirken sensorler ve motor sürücü devrelerinden gelen bilgiler aşamalı olarak LabVIEW ortamına alınmıştır. Bu aşamalar gerçekleşirken gerçek zamanlı olarak işlenen tüm bilgiler LabVIEW görsel ara yüzünde anlık olarak görüntülenip kontrolü sağlanmıştır. Gerçekleştirilen tüm görevler ayrıca bir raporlama yapılarak kullanıcıya sunulmuştur. LabVIEW ortamı bu çalışma kapsamında geliştirilebilir bir ortam olarak tasarlanmış uygulanabilirliği ile görevlerin tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır.

LabVIEW bu çalışma kapsamında araç olarak kullanılmasına rağmen günümüzde uygulanması planlanan ağır sanayide robotlaşma işlemlerini içeren endüstri 4.0 yapısının geliştirilmesinde kullanılabilecek bir yazılım türü olabileceği düşünülmektedir. LabVIEW yazılımı günümüzde çeşitli gömülü sistemler ile NI VISA protokolleri kullanılarak lifabase yazılımı aracılığı kolayca haberleşebilmesi, bilgisayarlı görme sistemlerini içermesi ile web destekli haberleşme protokollerinin bulunması vb. endüstri 4.0 için gerekli olan sistemlerin geliştirilmesinde ve zeki sistemlerin kurulmasında yardımcı olabilecek bir yazılım geliştirme platformu olabileceği öngörülmektedir. Bu çalışma kapsamında bu uygulamaların mini bir prototipi gerçek zamanlı uygulanmış

yapılabilirliği ortaya koyulmuştur. Bunun yansira kargolama işlemlerinde karar destek sistem yazılımlarının görselleştirilmesinde kolaylık sağlayacağı anlaşılmıştır. Raf düzenle sistemlerinin geliştirilerek gerçek zamanlı olarak izlenebilmesinde, bilgi birikimlerinin sağlanmasında ve sistem olarak kurulmasında olanak sağlayabilecek platformların kurulmasında kolaylık sağlayacaktır. Bu kolaylıklar kargolamanın yanında büyük otomasyon sistemlerine sahip fabrikalar, iş ve işlem yükümlülüğü fazla olan kamu kurumu ile kuruluşlarının yanında büyük ve küçük ölçekli işletmelerdeki depoların içerisinde bulunan raf düzenleme işlemlerine kolaylık ve hız getireceği anlaşılmıştır. Bu uygulamaların geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması tüm kurumların ve kuruluşların depolama ile kargolama hizmetlerinde mal ve hizmet durumlarını geliştireceği gibi iş gücü ile maliyet durumlarını azaltacağı zamandan tasarruf sağlayarak ülke ekonomisine katkı sağlayıp kalkınmada etkili olabileceği düşünülmektedir.

## Yazar Katkıları

M.D. tarafından lisans bitirme tezi olarak fikir oluşturulmuş uygulama gerçekleştirilmiştir. R.K. tarafından bilgisayarlı görü alanında uygulama geliştirilmesine destek verilmiştir, D.K. tarafından 3D Kartezyen robot ile mekatronik sistem tasarımında ve tez danışmanlığına destek sağlanmıştır, G.A tarafından LabVIEW yazılımı tasarımında destek alınmıştır. Tüm yazarlar makale yazımında destek sağlamıştır.

## Kaynaklar

- [1] Pallejà T.,Guillamet A.,Tresanchez M.,Teixidó M.,del Viso A.F.,Rebate C. \$ Palacín J. Implementation of a robust absolute virtual head mouse combining face detection, template matching and optical flow algorithms. *Telecommun Syst.* 2013; 52:1479–1489.
- [2] Chidanand Kumar K S. A vision based application for virtual mouse interface using finger –tip. *Int. Journ. Od Comp. Sci. and Information Tech.*2012;3(3):4460-4464.
- [3] Taşova O. Yapay Sinir Ağları İle Yüz Tanıma. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı. Haziran 2011.
- [4] Abduloğlu Ö.Görüntüde Logo Algılama ve Analiz. Yüksek Lisans Tezi. Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı.2017
- [5] Bradski G. and Kaehler A.Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library.O'Reilly Media United States of America.2008.16-17
- [6] Erişti E.Görüntü İşlemede Yeni Bir Soluk, OPENCV. Akademik Bilişim'10 - XII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, Muğla Üniversitesi. 10 - 12 Şubat 2010;223-229
- [7] Yu, Q., Cheng, H. H., Cheng, W. W., Zhou X., Ch OpenCV for interactive open architecture computer vision, *Advances in Engineering Software*, 2004;35: 527-536 .
- [8] Demir M., Köker R.,Remote Control of an unmanned aerial vehicle based on computer vision using hand gestures. *International Conference on Advances in Science (ICAS)*, 2017;41
- [9] Demir M., Köker R.Desing And İmplementation of A Vision Based Face Recognition System By Surf Method. *Intern Conf. on Advanced Technologies(ICAT)*.2018;8
- [10] Bay H., Ess A., Tuytelaars T. and Gool L.V. SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*.2008;110( 3),346-359.
- [11] Teke M., Temizel A.Çoklu Bant Uydu Görüntülerinin Ölçek Sınırlandırılmış SURF Kullanılarak Çakıştırılması. *Enformatik Enstitüsü. Orta Doğu Teknik Üniversitesi*.2010
- [12] Karakuş P., Karabörk H. SURF Algoritması Kullanılarak Uzaktan Algılama Görüntülerinin Geometrik Kaydı. 5. Uzaktan Algılama-Cbs Sempozyumu (Uzal-Cbs 2014) İstanbul,14-17 Ekim 2014
- [13] <http://www.ni.com/en-tr/shop/LabVIEW.html> Erişim Tarihi: 10.07.2023
- [14] <http://www.dinamkemaloglu.com/LabVIEWnedirveneleryapilir.html>.ErişimTarihi:10.07. 2023
- [15] M. Drew S.Integration of National Instruments'LabVIEW Software into the Chemistry Curriculum1.Department of Chemistry.Carleton College.*Journal of Chemical Education*. 1996;73,12
- [16] Serbet, F., Kaya, D., Kaya, T. Design of Window Function in LABVIEW Environment. *International Journal of Modern Research in Engineering and Technology (IJMRET)* 2018; 3(10): 1-5.



## Hasas Baba Türbesi'nin Fotogrametrik Rölöve Alımı ve Farklı Yazılımlarda Doğruluk Araştırması

Pelinsu YILDIRIM DEMİR<sup>1</sup>, Aydan YAMAN<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Harita Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye  
<sup>1</sup> mkaharita@gmail.com, <sup>2\*</sup> aydanyaman@aksaray.edu.tr

(Geliş/Received: 13/06/2023;

Kabul/Accepted: 06/10/2023)

**Öz:** Fotogrametrik rölöve çalışmaları kültürel mirasımızın dokümantasyon işlemlerinde yıllardır kullanılmaktadır. Son zamanlarda gelişen teknoloji ile birlikte fotogrametrik çalışmalar da sürekli yenilenmektedir ve tarihi ve kültürel miraslarımızın daha hızlı, kolay bir şekilde ve yeterli doğruluklarda belgeleme çalışmalarının yapılmasına olanak sağlamaktadır. İnsansız Hava Aracı (İHA) fotogrametrisi de özellikle son yıllarda oldukça tercih edilen bir fotogrametri tekniği olarak kendisine yer edinmiştir. Bu çalışmada, Aksaray il merkezinde bulunan, hakkında yazılı bir kitabe olmadığından dolayı tam olarak tarihi bilinmeyen ancak mimari özellikleri göz önüne alındığında Anadolu Selçuklu Devleti'nin son zamanlarında ya da Karamanoğulları zamanında inşa edildiği düşünülen Hasas Baba Türbesi, İHA uçuş verileri ve üç farklı fotogrametrik yazılım kullanılarak 3B modellenmiştir. Fotogrametrik tekniklerle 3B modelleme çalışması için Agisoft Metashape Professional yazılımı, Pix4D Mapper yazılımı ve Context Capture yazılımı kullanılmıştır. Daha sonra her üç yazılım için de konum ve yükseklik hatası araştırılmış ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde her üç yazılım için sırasıyla konum hatası 3.39cm, 3.66 cm ve 3.42 cm bulunmuştur. Yükseklik hatası ise sırasıyla 3.04 cm, 3.24 cm ve 3.28 cm olarak bulunmuştur. Sonuçların hata sınırı içerisinde kaldığı ve restorasyon projelerinde altlık olarak kullanılabilen sonuçuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** 3B model, fotogrametri, insansız hava aracı, hasas baba türbesi.

### Photogrammetric Relief of Hasas Baba Tomb And Accuracy Research In Different Softwares

**Abstract:** Photogrammetric relief studies have been used for years in the documentation of our cultural heritage. Photogrammetric studies are constantly being renewed with the technology that has been developing recently, and it allows for faster, easily and sufficient accuracy documentation of our cultural heritage. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry has also gained its place as a highly preferred photogrammetry technique, especially in recent years. In this study, the Hasas Baba Tomb, which is located in the city center of Aksaray, its exact date is not known due to the absence of a written epitaph, but which is thought to have been built in the late Anatolian Seljuk State or during the Karamanoğulları period if considering its architectural features, was 3D modeled using UAV data and three different photogrammetric software. Agisoft Metashape Professional, Pix4D Mapper and Context Capture software was used for 3D modeling. Then, the position and height accuracy was investigated and it was concluded that the position accuracy was found as 3.39, 3.66 and 3.42 cm for all three software, respectively. And height accuracy was found that 3.04, 3.24, 3.28 cm respectively. The results are within the margin of error and can be used as a base in restoration projects.

**Key words:** 3D model, photogrammetry, unmanned air vehicle, hasas baba tomb.

#### 1. Giriş

Kültürel miraslar, toplumsal değerleri yansıtan, geçmişe ışık tutan, geçmişten geleceğe bağ kuran, toplumları ve insanları birbirine bağlayan önemli bir hazinedir. Her toplum dünya üzerinde izler bıraktığından aynı zamanda evrensel bir ortak mirastır [1]. Ancak her geçen gün depremler, hava koşulları, savaşlar, insani etkenler gibi nedenlerden dolayı tarihi ve kültürel miraslarımız zarar görmektedir. Tarihi eserlerin doğal dokularının zarar görmeden belgelenmesi ve korunması, gelecek nesillere olduğu gibi aktarılması için vazgeçilmez bir unsurdur. Sadece ülkemizde değil, dünyanın pek çok yerindeki kültürel mirasın günden güne zarar gördüğü bir gerçektir ve bu eserlerin belgelenerek kayıt altında tutulması çok önemlidir [2]. Metrik, yazılı ve görsel belgeleme, kültürel mirasın mevcut durumu ve problemlerinin tespiti ile bu problemlerin çözümüne ilişkin her türlü koruma

\* Sorumlu yazar: [aydanyaman@aksaray.edu.tr](mailto:aydanyaman@aksaray.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-5242-2219, <sup>2</sup> 0000-0001-8739-066X

çalışmalarında temel veri olarak kullanıldığı gibi kültürel mirasın gelecek kuşaklara aktarılmasının ve topluma tanıtılmasının da önemli bir yoludur [3,4].

Geçmişten günümüze ülkemiz konumu sebebiyle pek çok medeniyete ev sahipliği yapmıştır. Ülkemizin coğrafyasında varlık gösteren her medeniyet kendi kültürünü yansıtan başta mimari olmak üzere farklı alanlarda eserler ortaya çıkarmıştır. Bu eserlerin büyük bir bölümü günümüze kadar ulaşmayı başarmış ve pek çok özelliğini koruyarak sağlam kalmıştır. Zaman içerisinde bu kültürel mirasların korunması giderek daha zor hale gelmiş ve yeni koruma yöntemlerine duyulan ihtiyacı gözler önüne sermiştir. Kültürel mirasın belgelenmesi hız ve güvenilir veri gerektirmektedir. Fotogrametri çoğunlukla bu ihtiyaçları tam olarak karşılayan bir yöntemdir.

Fotogrametri, görüntü algılama sistemleri ile yeryüzü ve çevresi hakkında güvenilir bilgilerin elde edilmesini sağlayan ve bu bilgilerin kaydedilmesine, ölçümüne ve analiz edilmesine olanak veren bir teknolojidir [5]. Üç boyutlu (3B) model oluşturmak için çok büyük objelerden küçük objelere kadar veri elde edilebilmektedir. Bu modellerin elde edilmesinde çeşitli fotoğraf makinaları ve insansız hava araçları donanımları kullanılabilir. Cisimlerin bindirmeli olarak çekilen fotoğrafları sayesinde cismin bilgisayar ortamında 3B modeli rahatlıkla kısa zamanda elde edilebilmektedir [6].

Ancak ortam koşulları ve nesnelerin boyutları klasik fotogrametrik yöntemlerle veri elde edilmesini engelleyebilmektedir. Günümüzde İHA'lar fotogrametrik veri toplamada yaygın olarak kullanılmaktadır. İHA Fotogrametrisi yeni bir terminoloji olup, platformda pilot oturmadan uzaktan kumandalı, yarı otonom veya otonom olarak çalışan fotogrametrik ölçüm platformlarını ve İHA görüntülerinin fotogrametrik olarak işlenmesini açıklamaktadır [2,7].

Kültürel mirasın dokümantasyonu gibi çalışmalarda fotogrametri yöntemi maliyet ve zaman tasarrufu açısından ve aynı zamanda tehlikeli alanlarda alet operatörünün güvenliğini sağlama açısından avantajları ile sıklıkla tercih edilen bir yöntem olmuştur [8]. Zaman içerisinde teknolojinin de gelişmesiyle fotogrametri biliminin bulunduğu yöntem ve çözümler de gelişme göstermiştir. Bu bağlamda kültürel miraslar için fotogrametrik rölöve çalışmaları oldukça fazla ön plana çıkmaktadır. Özellikle günümüzde fotogrametri biliminde ön plana çıkan insansız hava araçları (İHA) ile veri toplanması, kültürel mirasların üç boyutlu (3B) modelinin üretilmesi noktasında uygulayıcılara hızlı ve ekonomik kolaylıklar sağlamaktadır [9]. Özellikle kültürel mirasın dijital olarak arşivlenmesi ve sonraki nesillere korunarak aktarılması hususunda ön plana çıkan fotogrametrik rölöve çalışmalarında İHA sık kullanılan bir yöntemdir.

İnsansız hava araçları geçmişte askeri amaçlarla kullanılsa da günümüzde haritacılık uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. İHA' lar sayesinde küçük alanlarda büyük ölçekli topoğrafik haritalar ve 3B modeller düşük maliyetli bir şekilde üretilebilmektedir [10]. İnsansız hava araçlarının kullanımı gelişen teknoloji ile birlikte yazılım ve donanımlardaki gelişmelerle beraber günümüzde mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. İHA' lar, farklı yükseklik ve hızlarda uçuş imkanı sağlaması, yüksek çözünürlüklü ve farklı özelliklere sahip kamera kullanımına olanak vermesi ile kullanıcılara birçok avantaj sağlamaktadır [11].

Gelişen teknoloji ile birlikte tarihi yapılar, arkeolojik alanlar gibi önemli yapı, anıt veya alanlara duyulan merak artmakta ve bunları koruyabilmek için önemli çalışmalar yapılmaktadır. Bu konuda kültürel eserlerin belgelenmesi çalışmaları çok önemlidir. Tarihi eserlerin belgelenmesi ve dijital olarak arşivlenebilmesi için uzun zamandır farklı birçok teknik denenmiştir ancak şimdiye dek kullanılan yöntemlerden hiçbiri fotoğraf çekmekten daha pratik çözümler sunamamıştır [12]. Günümüzde İnsansız Hava Araçları (İHA), yersel yöntemlerle çok uzun sürebilen çalışmalarda, çok büyük ölçekli harita üretiminde, 3B modelleme çalışmalarında ve insanın olabileceği hemen hemen tüm çalışmalarda en önemli alternatif olarak görülmektedir [13]. İHA fotogrametrisi bir hava aracı platformu olarak kullanılan ve havadan çekilen fotoğrafların değerlendirilmesi ile uygulanan bir fotogrametri sürecidir [14]. Teknolojinin de hızla gelişmesi ile İHA fotogrametrisi yöntemi tarihi eserlerin 3B modellenmesinde son yıllarda çok sık kullanılan bir yöntem olmuştur [15]. Bu süreçte 3B modellemesi üretilecek bir eser üzerinde yapılan çalışmalarda başarı sağlanabilmesi için doğru konumdan yeterli fotoğraf çekilmesi gerekmektedir [16].

Yazılım özelliklerinin devamlı gelişimi ve sonuçlarının doğruluğu zamanla daha da iyileşerek fotogrametriyi yaşayan, dinamik bir teknik haline getirmiştir [17]. 3B modelleme çalışmalarında fotogrametrik yazılımların 3B model doğrulukları birbiri ile kıyas edilebilir. Tarihi bir alan üzerinde yüksek çözünürlüklü hava görüntüleri kullanılarak farklı yazılımlarda değerlendirme yapılır. Bu değerlendirmede oluşturulan nokta bulutlarının kalitesini ve yazılım performansını ölçmek için çeşitli görseller kullanılır [18].

Son yıllarda dijital kameralar ve İHA donanımlarındaki gelişmeler nedeniyle 3B modelleme üzerine çok fazla çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar kültürel mirasın korunması ve kaydedilmesi için 3B modellemenin mümkün olduğunu göstermiştir [19]. [15]' te yapılan çalışmada Erzurum İli'nde bulunan Yakutiye Medresesi'nin İHA verilerinden yararlanarak 3B modelleme çalışması yapılmıştır. Çalışmada 10 adet kontrol noktası (check point) kullanılmıştır. Modelleme çalışması için Context Capture yazılımını kullanmışlar ve modelin karesel ortalama



hatasını X, Y, Z için sırasıyla 2.16, 2.26, 2.04 mm olarak hesaplamışlardır. Bu çalışmada ise 21 adet kontrol noktası kullanılarak aynı yazılım için karesel ortalama hata yatayda 3.42 cm bulunmuştur. [20], çalışmalarında arkeolojik kazıların belgelenmesi için İHA uygulamasını ele almışlardır. Arkeolojik kazılarda elde edilecek nesnelere birkaç saat içinde önemli ölçüde değişmesi nedeniyle İHA'lar gibi araçların ölçüm bandı ve takimetre gibi geleneksel ölçüm yöntemlerine uygun bir alternatif olacağından bahsetmişlerdir. Çalışma sonunda İHA gibi platformların kullanılması ile sürecin önemli miktarda hızlanacağını tespit etmişlerdir [15]. [21]' de yapılan çalışmada, Çin'de bulunan iki adet tarihi köprü'nün 3B dijital dokümantasyonu için İHA fotogrametrisi kullanarak yapısal model rekonstrüksiyon yönteminin potansiyeli araştırılmıştır. Çalışmada nokta bulutlarının yeniden yapılandırma hatasını %0,4 gibi düşük bir değerinde hesaplamışlardır [15]. [22], çalışmalarında, Koredeki Magoksa Tapınağı'nın 3B modelini oluşturmak için yersel lazer tarama ve İHA fotogrametrisinin bir kombinasyonunu kullanmaya odaklanmışlardır. Çalışma sonucunda İHA fotogrametrisi için karesel ortalama hata hesabı yapmışlardır. [16]' da yapılan çalışmada Kütahya Arkeoloji Müzesi'nde yer alan Demeter Heykelinin 3 boyutlu modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Araziye elde edilen veriler PhotoModeler (PM) yazılımında değerlendirilerek belirlenen fotoğraf çiftleri üzerinden 0,5 mm aralıklı yoğun nokta bulutu ve  $\pm 2,39$  cm ortalama konum hassasiyeti ile Demeter Heykeli'nin 3B modeli üretilmiştir. Bu çalışmada aynı yazılım için konum hatası  $\pm 3.39$  cm olarak bulunmuştur. [17]' de yapılan çalışmada tarihi bir bina cephesi seçilmiş ve bu cephenin Agisoft PhotoScan, Pix4D Mapper, Autodesk Remake yazılımlarında modellenmesi yapılmıştır. [23], yaptıkları çalışmada Espirito Santo anıtının 3B modellenmesini amaçlamışlardır. Bunun için İHA verilerinden elde edilen görüntüleri kullanarak Pix4D mapper Pro ve Agisoft Photoscan yazılımlarını karşılaştırmışlardır. [24], çalışmalarında Kapadokya'nın batısında, Aksaray ili sınırlarındaki Güzelyurt ilçesi, Sivrihisar köyü içerisinde bulunan Kızıl Kilise'nin belgeleme amaçlı fotogrametrik rölöve çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda Kızıl Kilise'nin dış cephesinin ölçekli çizimleri, üç boyutlu modeli ve nokta bulutları elde edilmiştir.

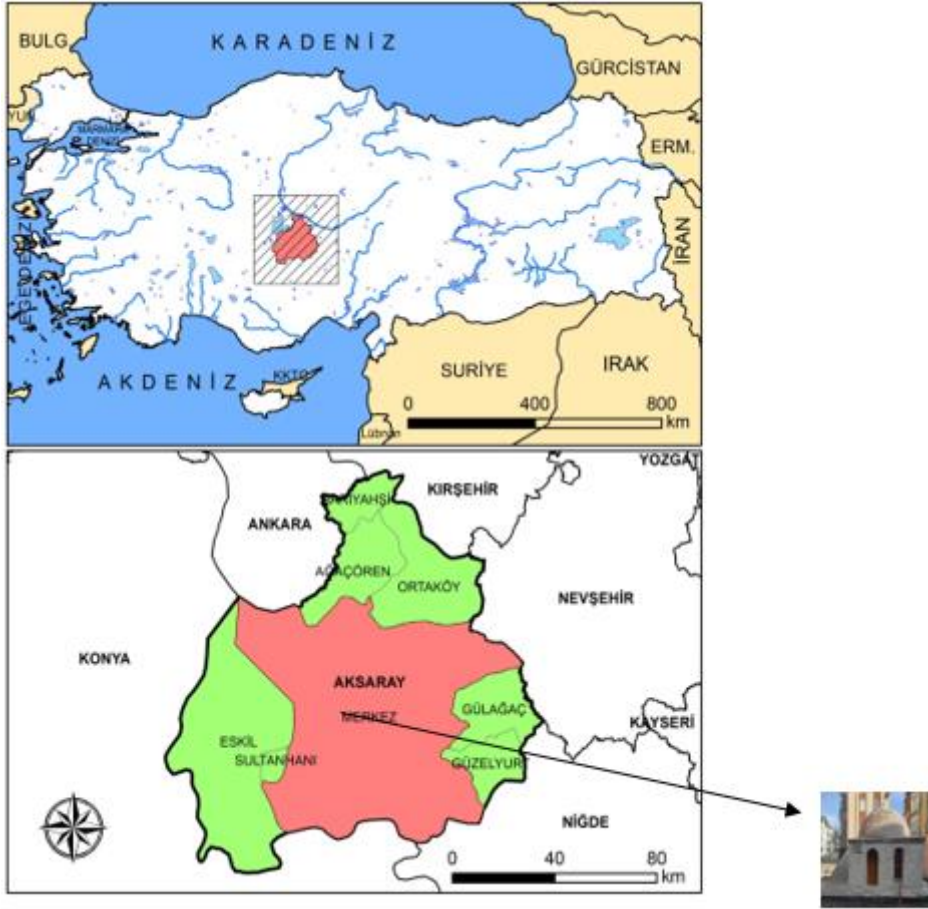
Bu çalışmada Aksaray ilinin önemli kültürel miraslarından biri olan Hasas Baba Türbesi'nin İHA teknolojilerinden faydalanarak hava fotoğraflarının elde edilmesinden sonra Agisoft Metashape Professional yazılımı, Pix4D Mapper yazılımı ve Context Capture yazılımlarında 3B modellerinin üretilerek karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmalarda kullanılan yazılımların görüntü işleme, doğruluk ve konum hassasiyetleri gibi çeşitli çıktı verileri dikkate alınmıştır. Literatürde kimin yaptığı ve hangi tarihte yapıldığını bildiren herhangi bir ibare bulunmayan ancak mimarisi göz önünde bulundurulduğunda Anadolu Selçuklu Devleti'nin son zamanlarında ya da Karamanoğulları zamanında yapıldığı düşünülen Hasas Baba Türbesi'nin, günümüze kadar bir kısmının korunarak ulaşması büyük bir şanstır. Bunun yanı sıra tarihi ile ilgili yazılı bir kayıt bulunmaması kültürel mirasların gelecek nesillere belgelendirilerek aktarılmasının ne kadar önemli olduğunu bir kere daha hatırlatmaktadır. Bu bağlamda kültürel mirasların 3B modellerinin oluşturulması ve bilimsel çalışmalara konu olması, bu eserlerin belgelendirilerek gelecek nesillere aktarılması hususunda oldukça faydalı olmaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Çalışma alanı

Aksaray geçmişten günümüze Hitit, Pers, Helenistik Dönem (Büyük İskender), Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı egemenliklerinde kalmıştır. Cumhuriyet dönemine kadar Konya'ya bağlı bir sancak olan Aksaray, 1920 yılında vilayet olmuş, 1933 yılında vilayetliği lağvedilerek Niğde'ye ilçe olarak bağlanmış ve 15 Haziran 1989 yılında yeniden vilayet olmuştur. Aksaray'ın adının ilk olarak eski Hitit metinlerinde geçen Nenessa (Nenossos) olduğu sanılmaktadır [25]. Selçuklular döneminde de II. Kılıçarslan tarafından Arkhelais olan adı Aksaray olarak değiştirilmiş ve ikinci başkent durumuna gelmiştir [25]. Anadolu Selçuklu Hükümdarı II. Kılıçarslan'ın birçok yapı inşa ettirmesiyle adeta baştan kurduğu Aksaray şehri Anadolu Selçuklu Devleti'nin çok önemli şehirlerinden birisi olmuştur. Hanedan üyelerinin ikamet ettiği bir şehir olan Aksaray'da hanlar, hamamlar, köşkler, camiler, türbeler, köprüler, mescitler gibi fazlaca yapılar inşa edilmiştir. Bu dönemden günümüze ulaşan eserlerden bazıları da türbelerdir. İl merkezinde Anadolu Selçuklu devrine ait olup tüm müstemilatı ile ayakta kalan bir türbe yoktur. Sadece cenazelik katı olan iki türbe binalar arasında varlığını korumaya çalışmaktadır.

Yapılan çalışmada ele alınan Hasas Baba Türbesi, Aksaray il merkezinde Hasas Mahallesi'nde bulunan tarihi bir eserdir. Türbenin konumu Şekil 1' de gösterilmiştir.



Şekil 1. Hasas Baba Türbesi'nin konumu.

İç kısmı yaklaşık 3.44 X 3.50 m ölçülerinde olup kare şeklinde bir plana sahiptir. Zemini ve duvarları yarısına kadar ahşap, tavanı ise pvc malzemelerle kaplanmıştır. Kuzeyinde 2.43 X 0.66 m ölçülerinde ve beton malzeme ile yapılmış bir kabir görülmektedir. Girişin tam karşısında ise sivri kemerli bir açıklık vardır. Bu açıklıkla bağlantılı 1.25 m yüksekliğinde bir havalandırma bacası bulunmaktadır. Cenazeliğin üzeri ise bir aynalı tonozla örtülmüştür. Cenazeliğin üstünde ise, sonradan sembolik bir açık türbe inşa edilmiştir. Etrafı yaklaşık 1.00 m. yüksekliğinde kesme taş malzemeden inşa edilmiş birduvarla çevrilmiş 4.57 X 3.52 m ölçülerinde dikdörtgen planlıdır. Ortasında mermer malzemeden yapılmış "Hashas Baba'nın" sembolik mezarı görülmektedir [26]. Anadolu Selçuklu Devleti ve Karamanoğulları zamanının mimarisine uygun iki katlı türbe yapıların yaygın görünmesi sebebiyle bu eserin Anadolu Selçuklu Devleti ya da Karamanoğulları devrinde inşa edildiği düşünülmektedir. Türbeden, günümüze sadece cenazelik ya da mumyalık denilen kısım ulaşmıştır [26]. Türbenin genel görünümü Şekil 2' de gösterilmiştir.

Türbe, son dönemde Aksaray Belediyesi'nin yoğun çalışmaları ile eski fotoğraflarına bağlı kalınarak restore edilmiştir. Eski fotoğraflardan yararlanılarak yapılan restorasyon çalışması, bizlere kültürel mirasların aslına uygun olarak belgelenecek geleceğe aktarılmasının ne kadar önemli olduğunu hatırlatmaktadır.



Şekil 2. Aksaray’ da bulunan Hasas Baba Türbesi’ nin genel görünümü.

## 2.2. Kamera kalibrasyonu

İnsansız hava aracı (İHA) teknolojisi her geçen gün gelişmektedir ve artan talepler doğrultusunda İHA donanım ve yazılımları da sürekli olarak geliştirilmektedir. Klasik jeodezik ölçme yöntemlerine göre öncelikle maliyetinin düşük olması nedeniyle tercih edilen İHA'lar, yersel ölçüm cihazlarının yerini almıştır ve giderek de kullanımı yaygınlaşmaktadır. Fotogrametrik çalışmalarda kullanılan en önemli donanım kameradır. [27,28,29]. Özellikle maliyet açısından metrik olmayan kameralar tercih edildiği durumlarda ortaya çıkacak geometrik hataları düzeltmek ve hassas iç yöneltme parametreleri elde etmek için kamera kalibrasyonu yapılması gerekmektedir [30,31]. Fotoğraflardan, yani iki boyutlu görüntülerden üç boyutlu metrik bilgi çıkarabilmek için yapılan işleme kamera kalibrasyonu denir. Kamera kalibrasyonu aslında kamera sistemini en iyi şekilde ifade eden parametrelerin bulunması olarak ifade edilir. Bu parametreler bilindiği üzere resim çekme merkezinin uzaklığı (odak uzaklığı  $c$ ), asal nokta koordinatları ile distorsiyon parametreleridir. Aynı zamanda bir resim çekme makinesinin kalibrasyonu fotogrametrik nokta belirleme işleminin tersi olarak da ifade edilebilir. Fotogrametrik nokta belirlemede iç yöneltme elemanları bilinir ve cisim noktalarının koordinatları istenir. Kalibrasyonda ise cisim noktalarının koordinatları bilinir ve iç yöneltme elemanları aranır [32].

Fotogrametrik çalışmalar kapsamında ele alınan kamera kalibrasyonu fotoğraflardan doğru bilgiler çıkarabilmek ve güvenilir 3 boyutlu modeller üretebilmek için birinci işlem adımı olarak görülmektedir. Bu amaçla, yapılacak tüm fotogrametrik çalışmalarda öncelikli olarak kamera sistemleri kalibre edilmelidir [33,34]. Kamera kalibrasyonu probleminin çözümü farklı yöntemler kullanılarak ele alınabilir [35]. Bunlardan ilki kamera iç ve dış yöneltme parametrelerinin belirlendiği self kalibrasyonlu yaklaşımdır [36]. Diğerleri ise iki boyutlu görüntülerden 3B bilgi çıkarımı için geliştirilen hareket ile nesne oluşturma tekniğidir (SFM- structure from motion). Günümüzde self kalibrasyonlu demet dengelemesi yöntemini kullanan ticari ve açık kaynak kodlu birçok fotogrametrik yazılım mevcuttur [37]. Self-kalibrasyon yönteminin matematik modeli, temel olarak doğrusallık koşulu denklemlerini temel almaktadır.

Yapılan çalışmalarda düşük maliyetle yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmek istenmektedir. Ayrıca işlerin daha kolay ve hızlı yürütülmesi herkesin temel amacıdır. Yüksek doğruluk yanında maliyet de çalışmalarda önemli bir faktördür [38,39]. Yersel fotogrametride tarihi eserlerin deformasyon analizi, 3 boyutlu modelleme, kültürel mirasın belgelenmesi gibi bilinen tüm çalışmalardan önce veri üretim birimleri olan kameraların kalibre edilmesi kaçınılmazdır [40,41]. Yüksek maliyeti nedeniyle metrik kameralar yerine kullanılan metrik olmayan kameraların kullanıcılar tarafından kalibre edilmesi gerekmektedir. Farklı yazılımlar genellikle kamera kalibrasyon işlemi için kullanıcılara 2D test platformları sunar.

Yaygın olarak gerçekleştirilen, test platformunun basılı kopya olarak yazdırıldığı kalibrasyon işlemidir. Test alanının çıktısı alınarak yapılan kalibrasyonlar, standart A4 kağıt boyutunda çıktı alınarak yapılır [38].

## 2.3. Arazi uygulaması

Uygulamaya geçilmeden önce eserin bulunduğu bölgede fizibilite ve istikşaf çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle eserin etrafında bulunan binaların konum ve yükseklikleri, bölgedeki mevcut ağaçların yapıya olan uzaklıkları, etrafında bulunan elektrik direkleri ile elektrik tellerinin yükseklikleri, yapının il merkezinde olmasından dolayı araç ve yaya trafiği gibi durumların gözeticilerle uygulama yapılabilecek en uygun saat

belirlenmesi gibi ön hazırlıklar tamamlandıktan sonra hava durumu ile ilgili Meteoroloji İl Müdürlüğü'nden hava tahminlerini de alarak arazi çalışması için en uygun gün ve saati planlayarak arazi uygulamasına başlanmıştır.

Uygulama sahasında öncelikle 6 adet yer kontrol noktası (YKN) belirlenmiştir. Bu belirleme yapılırken YKN'lerin çalışma alanına homojen olarak dağılmasına, birbirlerini görecekt yerlerde olmalarına, hava fotoğraflarında net bir şekilde görülebilecek renkte ve büyüklükte olmalarına dikkat edilmiştir. YKN'ler TUSAGA Aktif CORS-TR sisteminde ölçülmüştür. YKN'lerin tesisi için E-Survey E600 IMU GNSS alıcısı kullanılmıştır. GNSS alıcısına UTM projeksiyonu, 3 derece 33 dilim orta meridyeni, ITRF-96 datumu, GRS80 elipsoid, 2005.0 epok tanımlanarak YKN ölçümleri tamamlanmıştır ve zemine işaretlenmiştir.

YKN'ler tesis edildikten sonra eser üzerinde bulunan belirgin noktalardan oluşmak üzere yatayda ve düşeyde toplam 15 adet detay noktası tespit edilmiştir ve bu noktalara kâğıt plakalar yerleştirilerek detay noktaları eser üzerinde işaretlenmiştir. Detay noktalarının ölçüm işlemi için Topcon GPT-3500 marka/model reflektörsüz okuma özelliğine sahip total station cihaz kullanılmıştır (Ölçme hassasiyeti: 2 mm+2 ppm). Öncesinde tesis edilen 6 adet poligon noktası ile geriden kestirme ölçü yöntemi uygulanarak detay noktalarının X, Y ve Z koordinat değerleri elde edilmiştir.

Tüm bu hazırlıkların ardından İHA uçuşu başlatılmıştır. Uygulamada DJI Air 2S marka insansız hava aracı kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. İHA DJI Air 2S.

Hasas Baba Türbesi Aksaray il merkezinde bulunduğu ve etrafı binalar, istinat duvarı, elektrik direkleri vb. ile çevrili olduğundan sabit bir yükseklikte otonom uçuş yapılamamış, uygulama sırasında eserin tüm cephelerini tam olarak görüntüleyebilecek şekilde manuel uçuş yapılmıştır (Şekil 4). İHA verileri ortalama 5 m, 10 m ve 15 m yükseklikten uçuş yapılarak %60 enine, %70 boyuna bindirme oranıyla elde edilmiştir. Fotoğraf çekimi sırasında, eserin üretilecek olan 3B modelinin yüksek çözünürlük ve hassasiyette olması için YKN'lerin ve detay noktalarının fotoğraflarda görünür olmasına, yeterli sayıda olmasına ve doğru açıyla fotoğrafların çekilmesine dikkat edilmiştir. Yer örneklem aralığı 0.25 m olarak hesaplanmıştır. Toplam 35 adet fotoğraf çekilmiştir. Uçuş süresi 20 dakikada tamamlanmıştır.



Şekil 4. Hasas Baba Türbesi'nden alınan İHA görüntüleri.

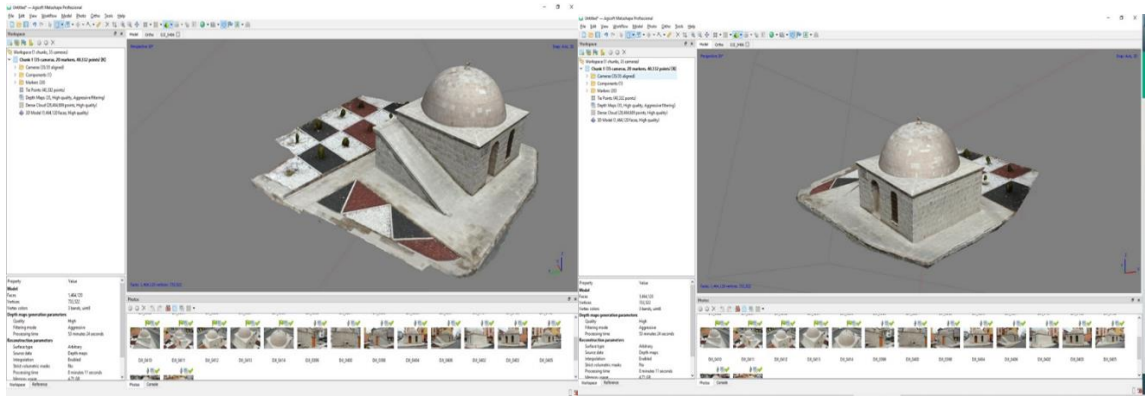
## 2.4. Büro çalışması

Kültürel miraslarımızdan Hasas Baba Türbesi'nin İHA uçuşu ile alınan görüntü verileri üzerinden fotogrametrik değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Bu çalışmada üç farklı ticari yazılımda fotogrametrik

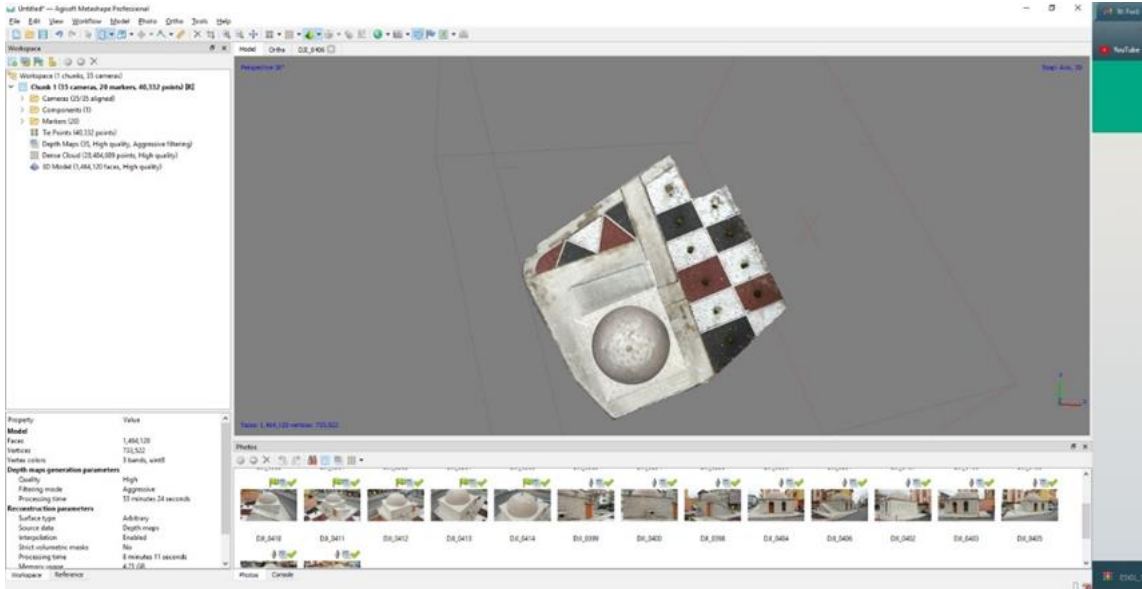
değerlendirmeler yapılarak ve neticesinde yazılımların sunmuş olduğu sonuç ürünlerinin konum hassasiyeti, görüntü giydirmeye kalitesi, arayüz kolaylığı, fotogrametrik değerlendirme süresi karşılaştırılarak İHA ile alınan görüntü verileri ile hangi yazılımda ne tür sonuçlarla karşılaşılabileceği üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmada Agisoft Metashape Professional, Pix4D Mapper ve Context Capture yazılımları kullanılmıştır. GNSS alıcısı ile elde edilen YKN koordinatları (X, Y, Z) kesin koordinatlar olarak kabul edilmiştir.

#### 2.4.1. Agisoft Metashape Professional yazılımı ile 3B model üretilmesi

Arazide İHA uçuşları ile temin edilen görüntüler bilgisayara aktarılmıştır. Agisoft Metashape Professional yazılımı kullanılarak 3B modelleme işlemine geçilmiştir. Öncelikle yeni proje oluşturularak projenin projeksiyon bilgileri ve koordinat sistemi tanımlanmıştır. Projede kullanılacak fotoğraflar içe aktarılmıştır. Kamera optimizasyonu sağlandıktan sonra YKN'lerin ve detay noktaların eklenmesi ve dengelenmesi işlemi yapılmıştır. Daha sonra sık nokta bulutu oluşturma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ardından doku giydirilmiş 3B model oluşturma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 5). Son olarak ortofoto üretilmiştir (Şekil 6). Bu işlem adımlarının sonucunda üretilen veri modelleri ile nokta bulutu, 3B model ve ortofoto sonuç verilerine ulaşılmıştır.



Şekil 5. Agisoft Metashape Professional yazılımında üretilen eserin farklı cephelerinden 3B modeller.



Şekil 6. Hasas Baba Türbesi' nin Agisoft Metashape Professional yazılımında üretilen ortofoto görüntüsü.

Tablo 1'de araziden alınan YKN ve detay noktalarının koordinatları ile Agisoft Metashape Professional yazılımı ile üretilen 3B model üzerinden alınan koordinatlar verilmiştir.

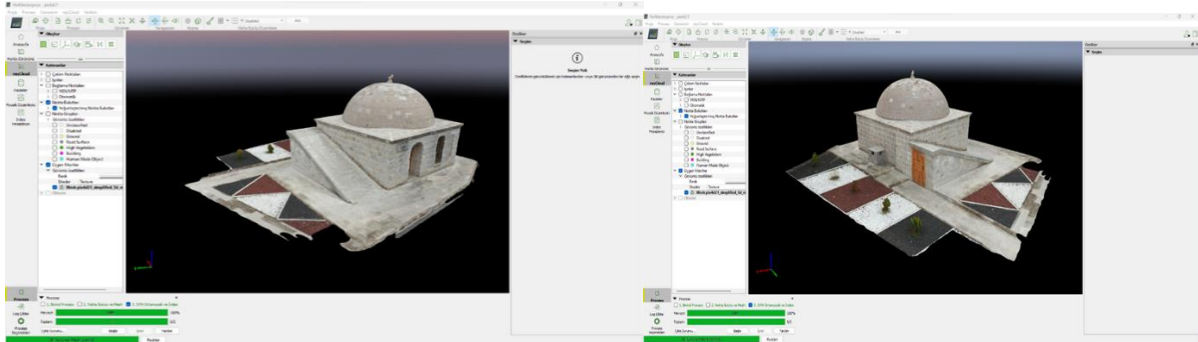
**Tablo 1.** YKN ve detay noktalarının arazi ve Agisoft Metashape Professional yazılımı için 3B model koordinatları

Arazide Elde Edilen (Kesin Koordinatlar)-ITRF 96				3B Modelden Elde Edilen Koordinatlar			Vi Farklar (mm)		
NN	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx	Vy	Vz
1	589579.633	4249985.366	979.442	589579.604	4249985.369	979.445	-29	3	3
2	589571.741	4249978.295	979.569	589571.753	4249978.255	979.550	12	-40	-19
3	589575.344	4249971.284	979.672	589575.369	4249971.302	979.659	25	18	-13
4	589579.373	4249968.631	979.707	589579.356	4249968.665	979.716	-17	34	9
5	589583.524	4249970.240	979.636	589583.507	4249970.263	979.694	-17	23	58
6	589584.107	4249972.344	980.015	589584.130	4249972.321	979.939	23	-23	-76
7	589580.558	4249979.308	981.703	589580.587	4249979.339	981.720	29	30	17
8	589581.013	4249977.584	982.203	589581.033	4249977.634	982.216	20	50	13
9	589576.246	4249975.460	982.217	589576.216	4249975.490	982.222	-30	30	5
10	589578.341	4249970.707	982.234	589578.309	4249970.724	982.203	-32	17	-31
11	589582.944	4249972.822	982.270	589582.952	4249972.79	982.281	8	-32	11
12	589579.734	4249972.423	983.585	589579.697	4249972.429	983.597	-37	6	12
13	589577.935	4249974.084	983.612	589577.963	4249974.100	983.616	28	16	4
15	589576.193	4249975.568	981.135	589576.188	4249975.553	981.163	-5	-15	28
16	589576.138	4249975.457	981.173	589576.141	4249975.425	981.203	3	-32	30
17	589578.213	4249970.691	981.148	589578.221	4249970.702	981.163	8	11	15
18	589578.341	4249970.627	981.276	589578.364	4249970.632	981.246	23	5	-30
19	589583.014	4249972.700	981.258	589583.020	4249972.663	981.221	6	-37	-37
20	589583.059	4249972.805	981.231	589583.063	4249972.821	981.258	4	16	27
21	589581.147	4249977.516	981.161	589581.145	4249977.526	981.194	-2	10	33

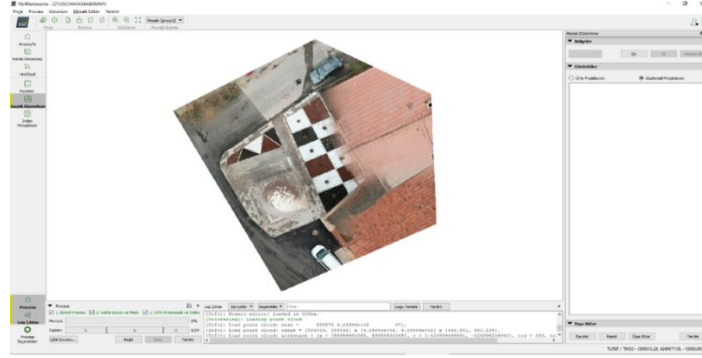
$m_{xy}=3.39142$  cmm $_z= 3.04414$  cm

#### 2.4.2. Pix4D Mapper yazılımı ile 3B model üretilmesi

Öncelikle yeni proje oluşturulmuş ve projenin projeksiyon bilgileri ve koordinat sistemi tanımlama işlemi yapılmıştır. Araziden alınan fotoğraflar projeye eklenmiştir. Oluşacak modelin koordinat sistemi tanımlanmıştır. Daha sonra seyrek nokta bulutu oluşturulmuş, yer kontrol noktaları ve detay noktaları projeye eklenerek model üzerinde referanslandırılmıştır. En son sık nokta bulutu ile eserin 3B modeli (Şekil 7) ve ortofoto üretimi (Şekil 8) sağlanmıştır.



**Şekil 7.** Pix4D Mapper yazılımında üretilen eserin farklı cephelerinden 3B modeller.



Şekil 8. Hasas Baba Türbesi' nin Pix4D Mapper yazılımında üretilen ortofoto görüntüsü.

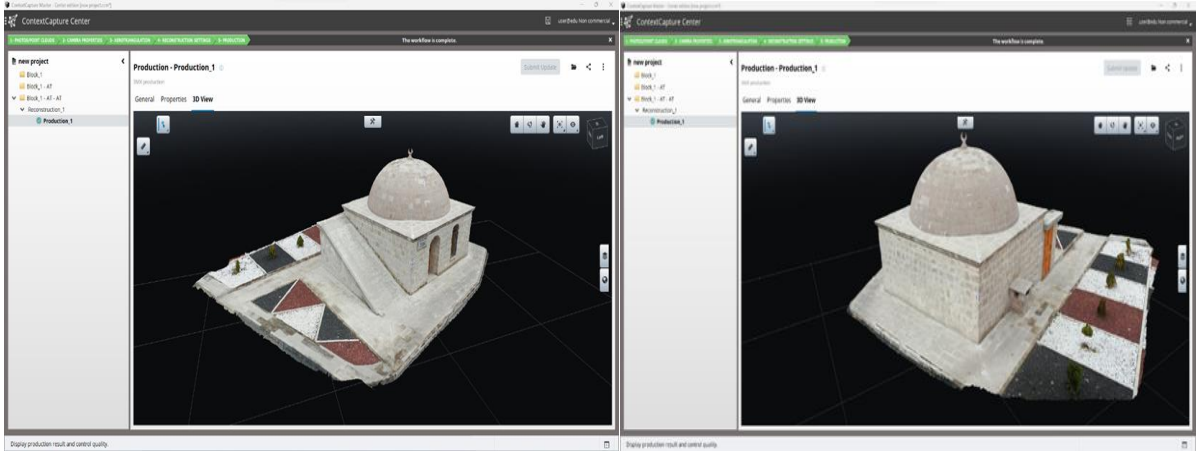
Tablo 2'de araziden alınan YKN ve detay noktalarının koordinatları ile Pix4D Mapper yazılımı ile üretilen 3B model üzerinden alınan koordinatlar verilmiştir.

Tablo 2. YKN ve detay noktalarının arazi ve Pix4D Mapper yazılımı için 3B model koordinatları.

Arazide Elde Edilen (Kesin Koordinatlar)-ITRF 96				3B Modelden Elde Edilen Koordinatlar			Vi Farklar (mm)		
NN	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx	Vy	Vz
1	589579.633	4249985.366	979.442	589579.657	4249985.358	979.460	24	-8	18
2	589571.741	4249978.295	979.569	589571.711	4249978.327	979.576	-30	32	7
3	589575.344	4249971.284	979.672	589575.329	4249971.271	979.684	-15	-13	12
4	589579.373	4249968.631	979.707	589579.398	4249968.600	979.747	25	-31	40
5	589583.524	4249970.240	979.636	589583.542	4249970.226	979.600	18	-14	-36
6	589584.107	4249972.344	980.015	589584.082	4249972.386	980.094	-25	42	79
7	589580.558	4249979.308	981.703	589580.519	4249979.269	981.695	-39	-39	-8
8	589581.013	4249977.584	982.203	589580.983	4249977.547	982.180	-30	-37	-23
9	589576.246	4249975.460	982.217	589576.283	4249975.432	982.188	37	-28	-29
10	589578.341	4249970.707	982.234	589578.382	4249970.697	982.257	41	-10	23
11	589582.944	4249972.822	982.270	589582.928	4249972.872	982.276	-16	50	6
12	589579.734	4249972.423	983.585	589579.774	4249972.424	983.582	40	1	-3
13	589577.935	4249974.084	983.612	589577.899	4249974.076	983.591	-36	-8	-21
15	589576.193	4249975.568	981.135	589576.198	4249975.583	981.094	5	15	-41
16	589576.138	4249975.457	981.173	589576.133	4249975.489	981.161	-5	32	-12
17	589578.213	4249970.691	981.148	589578.206	4249970.690	981.108	-7	-1	-40
18	589578.341	4249970.627	981.276	589578.317	4249970.629	981.292	-24	2	16
19	589583.014	4249972.700	981.258	589583.000	4249972.727	981.290	-14	27	32
20	589583.059	4249972.805	981.231	589583.052	4249972.798	981.244	-7	-7	13
21	589581.147	4249977.516	981.161	589581.142	4249977.508	981.138	-5	-8	-23
$m_{xy}=3.66031\text{cm}$ , $m_z=3.24232\text{cm}$									

### 2.4.3. Context Capture yazılımı ile 3B model üretilmesi

Context Capture yazılımında da öncelikle yeni proje oluşturulup fotoğraflar içe aktarılmıştır. Yer kontrol noktaları ve detay noktaları projeye eklenmiştir. Koordinat sistemi tanımlanmıştır. Fotoğraflar üzerinden kontrol noktaları referanslandırılmıştır. Bu adımlardan sonra seyrek nokta bulutu ve 3B model oluşturulmuştur. (Şekil 9).



Şekil 9.Context Capture yazılımında üretilen eserin farklı cephelerinden 3B modeller.

Tablo 3 'de araziden alınan YKN ve detay noktalarının koordinatları ile Context Capture yazılımı ile üretilen 3B model üzerinden alınan koordinatlar verilmiştir.

Tablo 3. YKN ve detay noktalarının arazi ve 3B model koordinatları.

Arazide Elde Edilen (Kesin Koordinatlar)-ITRF 96				3B Modelden Elde Edilen Koordinatlar			Vi Farklar (mm)		
NN	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>
1	589579.633	4249985.366	979.442	589579.604	4249985.367	979.444	-29	1	2
2	589571.741	4249978.295	979.569	589571.779	4249978.247	979.548	38	-48	-21
3	589575.344	4249971.284	979.672	589575.370	4249971.298	979.659	26	14	-13
4	589579.373	4249968.631	979.707	589579.357	4249968.658	979.722	-16	27	15
5	589583.524	4249970.240	979.636	589583.507	4249970.267	979.692	-17	27	56
6	589584.107	4249972.344	980.015	589584.149	4249972.300	979.940	42	-44	-75
7	589580.558	4249979.308	981.703	589580.589	4249979.340	981.721	31	32	18
8	589581.013	4249977.584	982.203	589581.035	4249977.597	982.217	22	13	14
9	589576.246	4249975.460	982.217	589576.224	4249975.490	982.240	-22	30	23
10	589578.341	4249970.707	982.234	589578.317	4249970.724	982.214	-24	17	-20
11	589582.944	4249972.822	982.270	589582.950	4249972.797	982.300	6	-25	30
12	589579.734	4249972.423	983.585	589579.705	4249972.427	983.615	-29	4	30
13	589577.935	4249974.084	983.612	589577.961	4249974.097	983.614	26	13	2
15	589576.193	4249975.568	981.135	589576.189	4249975.553	981.172	-4	-15	37
16	589576.138	4249975.457	981.173	589576.142	4249975.425	981.212	4	-32	39
17	589578.213	4249970.691	981.148	589578.220	4249970.700	981.163	7	9	15
18	589578.341	4249970.627	981.276	589578.363	4249970.633	981.265	22	6	-11
19	589583.014	4249972.700	981.258	589583.021	4249972.739	981.221	7	39	-37
20	589583.059	4249972.805	981.231	589583.060	4249972.818	981.273	1	13	42
21	589581.147	4249977.516	981.161	589581.145	4249977.525	981.196	-2	9	35
mxy = 3.41894 cm				mz = 3.27871 cm					

### 3. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada Aksaray il merkezinde bulunan Hasas Baba Türbesi'nin insansız hava aracı ile görüntüleri elde edilip bu görüntüler kullanılarak Agisoft Metashape Professional, Pix4D Mapper ve Context Capture yazılımlarında ayrı ayrı 3B modelleme işlemleri yapılmıştır. Bu işlem sonucunda arazide elde edilen kesin koordinatlar ile aynı noktalara ait yazılımlardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her üç yazılımda da modellere ait kontrol noktalarının koordinat farkları hesaplanmıştır. Daha sonra oluşturulan üç boyutlu modellere ait doğruluk analizleri yapılmıştır. Karesel ortalama hatalar hesaplanırken şu formüller kullanılmıştır:



$$V_y = Y - Y_k \quad V_x = X - X_k \quad V_z = Z - Z_k \quad (1)$$

$$m_y = \pm \sqrt{[V_y V_y] / n} \quad m_x = \pm \sqrt{[V_x V_x] / n} \quad m_z = \pm \sqrt{[V_z V_z] / n} \quad (2)$$

$$m_p = \pm \sqrt{[V_y V_y][V_x V_x] / n} \quad (3)$$

Bu formüllerde;

$Y_k, X_k$ : Model üzerinden elde edilen nokta koordinatları,

$Y, X$ : RTK GPS ile belirlenmiş nokta koordinatları,

$m_x$  = X yönündeki karesel ortalama hata,

$m_y$  = Y yönündeki karesel ortalama hata,

$m_z$  = Z yönündeki karesel ortalama hata,

$m_p$  = Konum ortalama hatası

$n$ : Nokta sayısını temsil etmektedir [42].

Yapılan doğruluk analizleri sonucunda elde edilen karesel ortalama hata değerleri ve her üç yazılımda üretilen nokta bulutu sayıları Tablo 4' te verilmiştir.

**Tablo 4.** 3 boyutlu modellerin farklı yazılımlarda elde edilen doğruluk analizi sonuçları ve nokta bulutu sayıları.

Yazılım Adı	$m_{xy}$ (cm)	$m_z$ (cm)	Nokta Bulutu Sayısı
Agisoft Metashape Professional	3.39142	3.04414	17353330
Pix4D Mapper	3.66031	3.24232	3380960
ContextCapture	3.41894	3.27871	9017360

Hesaplanan sonuçlara göre çalışmada kullanılan İHA görüntülerinin aynı şartlarda elde edilmiş olduğu, yer kontrol noktalarının arazide ölçülen koordinatlarının kesin koordinat kabul edilerek aynı noktalardan geo-referanslama yapıldığı ve tüm bu fotogrametrik çalışmaların aynı bilgisayarda gerçekleştirildiği bilgileri doğrultusunda bahsi geçen üç ayrı yazılımda da elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu ve BÖHNBÜY' de verilen sınırların içerisinde kaldığı görülmüştür. Aynı bilgisayar kullanılarak yapılan çalışmalarda Agisoft Metashape Professional yazılımı ile yapılan işlemlerin tamamı high hassasiyetinde nokta bulutu üretilerek yaklaşık 4 saat 30 dakika sürmüştür. Pix4D Mapper yazılımı ile yapılan işlemler yaklaşık 1 saat sürmüştür. Context Capture yazılımı ile yapılan işlemlerin tamamı yaklaşık 1 saat 30 dakika sürmüştür. Nokta bulutu sayılarına bakıldığında Agisoft Metashape Professional yazılımında diğer yazılımlara göre çok daha fazla nokta olduğu görülmektedir.

Konum ve yükseklik hassasiyeti olarak karşılaştırma yapıldığında, her ne kadar sonuçlar birbirine çok yakın olsa da Agisoft Metashape Professional yazılımı diğer yazılımlara göre daha hassas konum doğruluğu vermiştir. Ancak nokta bulutu, 3B model, ortofoto üretimini çok daha uzun bir zamanda tamamlayabilmiştir. Aynı zamanda Agisoft Metashape Professional yazılımının ara yüzü diğer yazılımlarına göre daha zor ve yavaştır. Pix4D Mapper yazılımının sonuç ürünlerini verme zamanı ve ara yüz kullanımı diğer yazılımlara göre daha hızlı ve kolaydır. Bunun yanı sıra Context Capture yazılımı giydirilmiş doku kalitesi bakımından diğer iki yazılıma göre öne çıkmaktadır. Yapılacak benzer çalışmalarda yoğun nokta bulutu ve sonuç hassasiyeti aranıyorsa Agisoft Metashape Professional yazılımı tercih edilebilir. Ancak daha az hassasiyetle kısa zamanda hızlı bir şekilde çalışmalar tamamlanmak istenirse Pix4D Mapper ya da Context Capture yazılımlarının tercih edilebileceği görülmüştür.

Fotogrametrik değerlendirilmesi yapılmış olan eserin şehir merkezinde olmasından dolayı etrafının yapılarla çevrili olması, araç ve yaya trafiğinin bölgede yoğun olması, uçuş sırasında etrafta güvercinlerin bulunması gibi durumlar İHA uçuşunu zorlaştırmıştır. Ancak uçuş sırasında yaşanan tüm bu zorluklara rağmen elde edilen sonuçlar BÖHNBÜY' de bahsedilen doğruluk sınırları içerisinde kalmıştır. Şehir merkezlerinde bulunan eserlerin fotogrametrik rölevo çalışmalarında yersel fotogrametri yöntemi de oldukça yaygındır ancak yersel fotogrametri yöntemi ile yapılan çalışmalarda eser çatısının fotoğraflanması dezavantajı da unutulmamalıdır. Bu durumlarda eserin çatı dahil olmak üzere tam olarak 3B modelinin elde edilebilmesi için mutlaka İHA desteğinin olması gerekmektedir [43]. Bu durumda da iki iş yükünün ortaya çıkması gibi bir dezavantaj ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla yapılan çalışmada bu dezavantaj da ortadan kaldırılmış olmaktadır. Kültürel mirasın belgelenmesi ve dijital arşivlenmesi kapsamında yapılan çalışmalarda İHA kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Ülkemizin İHA üretme konusunda yapmış olduğu atılımlar son derece mutluluk vericidir. Ancak yerli yazılım geliştirme konusunda da çalışmalar yapmak gerekmektedir.

Sonuç olarak kültürel mirasın gelecekteki nesillere aktarılması konusunda dijital arşivleme çalışmalarının öneminden sıklıkla bahsedilmiştir. Yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre fotogrametrik tekniklerle ölçülen eserlerin konum, yükseklik ve doku giydirilmiş görüntü verileri restorasyon çalışmalarında yeterli nitelikte altlık ihtiyacına cevap verebilecektir. Ayrıca fotogrametrik rölöve çalışmalarında 3B modeller üzerinden istenilen ölçünün alınabilmesi araziye gitme zorunluluğunu ortadan kaldırarak zaman ve emekten tasarruf edilmesini sağlayacaktır.

### Kaynaklar

- [1] Öztemiz S. Türkiye'de dijital kültürel miras ürünlerine açık erişim. Hiperlink eğit. ilet. yay. san. tic. ve ltd.sti, 2017.
- [2] Uysal M, Toprak A S, Polat, N. Photo realistic 3D modeling with UAV: Gedik Ahmet pasha mosque in afyonkarahisar. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2013; 40: 659-662.
- [3] Uslu A, Polat N, Toprak A S, Uysal M. Kültürel mirasın fotogrametrik yöntemle 3b modellenmesi örneği. Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi 2016; 8(2): 165-176.
- [4] Yakar M, Orhan O, Ulvi A, Yiğit, A Y, Yüzer M M. Sahip Ata Külliyesi Rölöve Örneği. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 2015; 10.
- [5] Bilgi S. Fotogrametri ve uzaktan algılamada veri elde etme yöntemlerinin gelişimi ve kısa tarihçeleri. Jeodezi ve Jeoinformasyon Dergisi 2007; 96: 48-55.
- [6] Oruç M E. Küçük objelerin modellenmesinde videogrametri ve fotogrametri yöntemlerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışma. Türkiye Fotogrametri Dergisi 2021; 3.2: 62-68.
- [7] Eisenbeiss H. UAV photogrammetry. Diss. ETH No. 18515. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen 2009; 105: 235.
- [8] Gagliolo S, Ausonio E, Federici B, Ferrando I, Passoni D, Sguerso D. 3D Cultural Heritage Documentation: a Comparison Between Different Photogrammetric Software and Their Products. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2018. 422: 347-354. Haupt RL, Haupt SE. Practical Genetic Algorithms. 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2004.
- [9] Sucu M S. İnsansız hava aracı (İHA) verilerinin kültürel mirasların belgelenmesinde kullanılabilirliği: Binbir Kilise örneği. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 2019.
- [10] Elkhrachy I. Accuracy assessment of low-cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry. Alexandria Engineering Journal 2021; 60(6): 5579-5590.
- [11] Fidancı Y, Karabörk H. İnsansız Hava Araçlarının Ormanlık Alanlardaki Karayolu Projelerinde Kullanımı. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2019; 9(3): 473-485.
- [12] Kaya Y, Yiğit A Y, Ulvi A, Yakar M. Arkeolojik alanların dokümantasyonunda fotogrametrik tekniklerinin doğruluklarının karşılaştırmalı analizi: Konya Yunuslar Örneği. Harita Dergisi 2021; 165: 57-72.
- [13] Makineci H B, Karasaka L. Investigation of 3D models acquired with UAV oblique images. Turkish Journal of Geosciences 2021; 2(2): 13-20.
- [14] Şenol H İ, Yiğit A Y, Kaya Y, Ulvi A. İHA ve yersel fotogrametrik veri füzyonu ile kültürel mirasın 3 boyutlu (3B) modelleme uygulaması: Kanlıdivane Örneği. Türkiye Fotogrametri Dergisi 2021; 3(1): 29-36.
- [15] Yiğit A Y, Ulvi A. İHA fotogrametrisi tekniği kullanarak 3B model oluşturma: Yakutiye Medresesi Örneği. Türkiye Fotogrametri Dergisi 2020; 2(2): 46-54.
- [16] Uslu A, Uysal M. Arkeolojik eserlerin fotogrametri yöntemi ile 3 boyutlu modellenmesi: Demeter Heykeli örneği. Geomatik 2017; 2(2): 60-65.
- [17] Villasenin S P, Docampo M G, Sanz J o. Desktop vs cloud computing software for 3D measurement of building façades: Themonastery of San Martín Pinarío 2020; 149, 106984.
- [18] Alidoost F, Arefi H. Comparison of uas-based photogrammetry software for 3D point cloud generation: a survey over a historical site 2017; Isprs Annals of Photogrammetry, Remote Sensing&Spatial Information Sciences, 4: 55-61.
- [19] Jeon E I, Yu S J, Seok H W, Kang S J, Lee K Y, Kwon O S. Comparative evaluation of commercial softwares in UAV imagery for cultural heritage recording: case study for traditional building in South Korea. Spatial Information Research 2017; 25(5): 701-712.
- [20] Sauerbier M, Eisenbeiss H. UAVs for the documentation of archaeological excavations. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2010; 38(5): 526-531.
- [21] Pan Y, Dong Y, Wang D, Chen A, Ye Z. Three dimensional reconstruction of structural surface model of heritage bridges using UAV based photogrammetric point clouds. Remote Sensing 2019; 11(10): 1204.
- [22] Jo Y H, Hong S. Three-Dimensional Digital Documentation of Cultural Heritage Site Based on the Convergence of Terrestrial Laser Scanning and Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. International Journal of GeoInformation ISPRS 2019; 8(2): 53.
- [23] Pádua L, Adão T, Hruška J, Marques P, Sousa A, Morais R, Lourenço J M, Sousa J J ve diğerleri. UAS-based photogrammetry of cultural heritage sites: A case study addressing Chapel of Espírito Santo and photogrammetric software comparison. In Proceedings of the International Conference on Geoinformatics and Data Analysis; New York. 72-76.

- [24] Ulvi A. Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners. *International Journal of Remote Sensing* 2021; 42(6): 1994-2021.
- [25] Karatay S. Aksaray ili yorgancılık sanatı. I. International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies; 2018; Antalya. 449-455.
- [26] Erdal Z. Aksaray'da fazla tanınmayan Anadolu selçuklu türbeleri. *Selçuk Üniversitesi Selçuklu Araştırmaları Dergisi* 2018; 8: 201-224.
- [27] Kılınç Kazar G, Karabörk H, Makineci H B. Evaluation of test field-based calibration and self-calibration models of UAV integrated compact cameras. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 2022; 50(1): 13-23.
- [28] Cramer M, Przybilla H, Zurhorst A. UAV cameras: Over view and geometric calibration benchmark. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences* 2017; 42: 85.
- [29] Yıldız F, Karabörk H, Yakar M, Yılmaz H M. Yersel fotogrametride kullanılan metrik olmayan dijital kameraların kalibrasyonunda kullanılan yazılımların incelenmesi üzerine bir çalışma. *Harita Dergisi* 2005; 134: 61-70.
- [30] Fryskowska A, Kedzierski M, Grochala A, Braula A. Calibration of lowcost RGB and NIR UAV cameras. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2016; 41: 817-821.
- [31] Sharma M, Raghavendra S, Agrawal S. Development of an open-source tool for UAV photogrammetric data processing. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 2020; 49(3): 659-664.
- [32] Taşdemir Ş, Ürkmez A, Yakar M, İnal Ş. Sayısal görüntü analiz işleminde kamera kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu 2009.
- [33] Makineci H B, Karasaka L, Şahin D. Fotogrametrik amaçlı kamera kalibrasyonu yazılımlarının kullanımı üzerine bir araştırma. *Türkiye Fotogrametri Dergisi* 2020; 2(1): 14-21.
- [34] Özdemir E, Duran Z. Popüler Kamera Kalibrasyonu Yazılımlarının Karşılaştırılması. *Tufuablx. Teknik Sempozyumu* 2019; 51-57.
- [35] Yılmaztürk F, Külür S. Sayısal Kameraların Self-Kalibrasyonu için Bir Yazılım Tasarımı. *Harita Dergisi* 2010; 144: 50.
- [36] Douskos V, Grammatikopoulos L, Kalisperakis I, Karras G, Petsa E. FAUCCAL: An open source toolbox for fully automatic camera calibration. In XXII CIPA Symposium on Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage, Kyoto, Japan 2009.
- [37] Dubská M, Herout A, Juránek R, Sochor J. Fully automatic roadside camera calibration for traffic surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2014; 16(3): 1162-1171.
- [38] Sağdıç Z S, Makineci H B, Karabörk H. Defining The Relationship Between The Diameters of The Points Used in 2D Test Platforms and The Parameters Obtained from Camera Calibration. *International Journal of Environment and Geoinformatics* 2022; 9(3): 108-117.
- [39] Şenyay L, Semerci H. Use of Grubbs Types of Implements in Comparison to The Precision of Two Measuring Equipment (İki Ölçüm Ekipmanının Hassasiyetlerinin Karşılaştırılmasında Grubbs tip Tahminleyicilerinin Kullanılması). *Journal of Dokuz Eylül University Faculty of Economics Administrative Sciences* 1999; 14(1): 1-9.
- [40] Tata H, Eteje O. Determination of Orthometric Heights of Points Using Gravimetric/GPS and Geodetic Levelling Approaches. *International Journal of Environment and Geoinformatics* 2022; 9(1): 52-59.
- [41] Duran Z, Atik ME. Accuracy comparison of interior orientation parameters from different photogrammetric software and direct linear transformation method. *International Journal of Engineering and Geosciences* 2021; 6.2: 74-80.
- [42] Erdoğan A, Mutluoğlu Ö. İnsansız Hava Aracı (İHA) ile Üretilen Şeritvari Haritalardan Kübaj Hesabı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi* 2020; 2(2): 61-66.
- [43] Karasaka L, Makineci H B, Erdal, K. Accuracy Assessment Toward Merging of Terrestrial Laser Scanner Point Data And Unmanned Aerial System Point Data. *Konya Journal of Engineering Sciences* 2023; 11(1): 124-135.



## Stock Price Forecasting Using Machine Learning and Deep Learning Algorithms: A Case Study for the Aviation Industry

Yunus Emre GÜR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
\*<sup>1</sup> yegur@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 09/09/2023;

Kabul/Accepted: 10/10/2023)

**Abstract:** With technological advances, humans are constantly generating data through various electronic devices and sensors, and this data is stored in digital environments. A vast amount of data has served as a valuable asset that has facilitated the rise and progression of novel fields, including data science, artificial intelligence (AI), deep learning (DL), and the internet of things (IoT). Effectively managing and analyzing data provides a competitive advantage for modern businesses. The objective of this study is to forecast the stock price of Turkish Airlines (THY), a publicly traded corporation listed on Borsa Istanbul. In order to achieve the intended objective, the utilization of machine learning approaches like SVM and XGBoost, as well as the deep learning algorithm Long Short-Term Memory (LSTM), are used. The models are trained over a time period including daily data from January 4, 2010 to September 5, 2023. The forecast performance of the models is evaluated by comparing the actual and predicted stock prices and the model with the lowest error is identified. The proposed models' performances are assessed using the RMSE, MSE, MAE, and R2 error statistics. According to the results obtained, it is determined that the LSTM model has lower error coefficients than SVM and XGBoost models and gives the best performance.

**Key words:** LSTM, stock price prediction, machine learning, deep learning, SVM, XGBoost.

### Makine Öğrenimi ve Derin Öğrenme Algoritmalarını Kullanarak Hisse Senedi Fiyat Tahmini: Havacılık Sektörüne Yönelik Bir Örnek Çalışma

**Öz:** Teknolojik ilerlemelerle birlikte, insanlar çeşitli elektronik cihazlar ve sensörler aracılığıyla sürekli olarak veri üretmekte ve bu veriler dijital ortamlarda depolanmaktadır. Bu büyük veri havuzu, yeni disiplinlerin doğmasına ve gelişmesine olanak tanıyan bir kaynak haline gelmiş; örneğin, veri bilimi, yapay zekâ, derin öğrenme ve nesnelerin interneti gibi alanlar ortaya çıkmıştır. Verilerin etkili bir şekilde yönetilmesi ve analiz edilmesi, modern işletmeler için rekabet avantajı sağlamaktadır. Bu çalışma, Borsa İstanbul'da (BIST) işlem gören Türk Hava Yolları AO (THYAO) şirketinin hisse senedi fiyatının tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla, makine öğrenmesi algoritmalarından Support Vector Machine (SVM) ve Extreme Gradient Boosting (XGBoost) ile derin öğrenme algoritması olan Long Short-Term Memory (LSTM) kullanılmıştır. Modeller, 4 Ocak 2010 ile 5 Eylül 2023 tarihleri arasındaki günlük verileri içeren bir zaman diliminde eğitilmiştir. Gerçek hisse senedi fiyatları ile tahmin edilen fiyatlar karşılaştırılarak modellerin performansları değerlendirilmiş ve en düşük hataya sahip model belirlenmiştir. Önerilen modellerin performansları RMSE, MSE, MAE ve R2 hata istatistikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre LSTM modelinin SVM ve XGBoost modellerine göre daha düşük hata katsayılarına sahip olduğu ve en iyi performansı verdiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** LSTM, hisse senedi fiyat tahmini, makine öğrenmesi, derin öğrenme, SVM, XGBoost.

#### 1. Introduction

The constant scientific and technological advancements has led to the perpetual generation of data by individuals through a multitude of electronic gadgets and sensors. Subsequently, this data is subsequently kept within digital surroundings. The substantial reservoir of data has served as a valuable asset, facilitating the rise and progression of novel fields of study, including including data science, artificial intelligence (AI), deep learning (DL), and the internet of things(IoT). In that point of view, data plays a pivotal part in various aspects of the corporate realm, encompassing the comprehension of customer behavior, product development, security protocols, tailored services, predictive analysis, and numerous other uses. Hence, proficiently overseeing and evaluating data confers a competitive edge to contemporary enterprises. The nature of data might vary in terms

\* Sorumlu yazar: [yegur@firat.edu.tr](mailto:yegur@firat.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-6530-0598.

of its types and structures, contingent upon the specific source from which it is acquired. The data is organized into graphs and presented in a sequential manner. Sequential data refers to a collection of actions that are executed either by people or machines. Sequential data refers to data that is arranged in a specific manner based on a particular attribute or characteristic, and is presented in a systematic order. An illustration of this concept can be seen in the distinction between the stock market index, which represents time-ordered data, and genomic data, which is structured based on a specific rule. Temporal data, which is characterized by its time-dependent nature, possesses a temporal component and should be regarded as a chronological sequence. Data of this nature are commonly referred to as time series or sequential data [1].

Yet, the stock market is a financial environment that frequently exhibits intricacy, unpredictability, and non-linearity. The analysis of macroeconomic and microeconomic issues holds significant importance in investment decision-making within the dynamic structure of financial markets. Nevertheless, due to the dynamic nature of these components and their susceptibility to several unclear variables, it becomes very challenging to consolidate all macro and micro aspects and accurately ascertain the exact magnitude of their impacts. Hence, financial time series forecasting is widely acknowledged as an intricate domain of study within the realm of finance and investing. Besides macroeconomic indicators, certain variables at the micro-level within sectors can also impact stock values. During periods of economic uncertainty, precise forecasting of these values becomes crucial for investors in order to mitigate financial risk [2,3].

Turkish Airlines (THY), the national carrier of Turkey, operates from its headquarters in Istanbul and garners significant attention from international investors. Its inclusion among the top five corporations with the highest trading volume on Borsa Istanbul (BIST) demonstrates interest in this sector. The business structure of THY has a notable impact on the aviation sector, primarily in relation to oil prices and foreign exchange rates. The impact of oil as the primary cost component for airline firms, along with the procurement of essential equipment like airplanes in foreign currency, has significant implications for THY's cost structure and overall profitability. Hence, fluctuations in oil prices and foreign exchange rates possess the potential to exert a direct impact on the stock performance of THY. Simultaneously, the inclusion of THY in both the BIST 100 and the Transportation Index implies that fluctuations in these indices possess the potential to impact the stock prices of THY. Hence, it is vital to take into account these aspects while attempting to assess the stock valuation of THY, the foremost publicly traded corporation in Turkey.

The primary objective of this study is to predict stock price of Turkish Airlines (THYAO) within the context of its trading on Borsa Istanbul. To get the desired goal, the utilization of machine learning techniques such as XGBoost, along with the deep learning technique known as LSTM, are implemented. The models underwent training utilizing daily data including the time period from January 4, 2010 to September 5, 2023. The evaluation of model performance involved an examination of the actual stock values and their associated predicted prices. The model that exhibited the least amount of error was identified as the most optimal choice.

The forthcoming sections of this paper will offer a thorough evaluation of the current body of work on machine learning (ML) and deep learning (DL) techniques employed within the context of stock price prediction. The subsequent sections offer a thorough elucidation of the SVM, XGBoost, and LSTM approaches. The analysis phase of the study focuses on the examination of the implementation process, while the conclusion section evaluates the gathered results and offers recommendations.

## 2. Literature Review

This section presents a summary of studies that have employed SVM, XGBoost, and LSTM algorithms in the context of predicting stock prices.

In their study, Fenghua et al. utilized the SSA approach to analyze and evaluate stock prices. The utilization of the SSA methodology is implemented to split stock values into multiple components, encompassing trend, market fluctuations, and noise, over diverse time intervals. This methodology successfully identifies and separates the distinct components that represent these varied economic characteristics. The aforementioned characteristics are subsequently included with the SVM machine learning technique to produce predictions for stock prices. The study involves conducting tests to compare two unique strategies, namely "EEMD-SVM" and "SSA-SVM". These techniques aim to improve stock price forecasts by integrating price information into SVM algorithms. Based on existing research, it is indicated that the incorporation of pricing characteristics into SVMs has the capacity to improve the precision of predictions. The SSA-SVM approach has been found to produce the most precise prediction results [4].

In their study, Pawar et al. examined the utilization of artificial neural network models, namely RNN and LSTM, for the purpose of anticipating stock market trends and managing investment portfolios. The research is

carried out utilizing historical stock data of the stocks contained within the portfolio, with a specific emphasis on the analysis of time series. Moreover, this study conducts a comparative examination of RNN and LSTM models, in conjunction with traditional Machine Learning Algorithms such as Regression, SVM, Random Forest, Feed Forward Neural Network, and Back Propagation. The results of the paper indicated that the RNN-LSTM model has a greater level of accuracy when compared to traditional machine learning methods [5].

In their study, Yang et al. undertook research with the objective of providing accurate predictions of stock prices, thereby assisting investors in capitalizing on transient fluctuations in the market. The dataset utilized in this investigation was given by Jane Street. The dataset under consideration encompasses a substantial volume of data, encompassing anomalous instances such as missing data. Hence, the initial step involves conducting feature engineering on the dataset and applying averaging techniques to handle missing data. This procedure results in preprocessed data that is suitable for subsequent modeling purposes. The empirical findings indicate that the amalgamation of XGBoost and LightGBM in a hybrid model yields superior predictive capabilities compared to both individual models and the neural network. This paper highlights the significance of employing models such as XGBoost and LightGBM for the purpose of forecasting stock prices. Furthermore, it asserts that superior prediction outcomes may be achieved through the integration of these models [6].

The primary emphasis of the work conducted by Kanakam et al. revolves around the application of MLP and SVM machine learning techniques for the purpose of predicting stock market trends. The focus of this research is to employ an analysis of a certain company's stock prices in order to forecast future stock values. The predictive capabilities of the model are derived on an analysis of historical data, specifically the past stock prices. The study involved the analysis of around 1300 stock prices pertaining to a specific company. Multiple linear regression and SVM machine learning techniques were employed to forecast the present stock prices of the company using this dataset. According to the regression findings of the study, the accuracy of predicting the stock price using multiple linear regression was 99% and the accuracy of the model using SVM was 93% [7].

Tokmak utilized deep learning methodologies, notably Long-Short Term Memory networks, to forecast stock values in their research study. The focus of the study was around four specific stocks that are part of the Technology Index of Borsa Istanbul. A dataset consisting of a total of 2578 daily data points collected between the years 2012 and 2022 was constructed for the purpose of this study. The dataset was employed to carry out training and testing procedures using the model. According to the results, the testing procedure demonstrate that the forecasts demonstrate a significant level of consistency and a strong alignment with the actual events. The focus of this study revolves around the forecasting of stock prices for four specific stocks within the Technology Index, utilizing deep learning methodologies like as LSTM . The results of this investigation illustrate the reliability of these predictions [3].

Vuong et al. employed sophisticated machine learning and deep learning techniques to enhance the efficacy of the Stock Price Prediction system for both stock and Forex datasets. In this study, XGBoost was employed as a feature selection strategy to extract significant features and eliminate redundant features from time series data with a high dimensionality. The chosen characteristics are inputted into a deep LSTM network in order to predict stock values. The deep LSTM network employed to capture the spatial patterns inherent in the input time series and effectively leverage future contextual information. The experimental findings obtained by analyzing Forex data indicate that this particular strategy exhibits superior performance compared to the basic autoregressive integrated moving average approach, as evidenced by lower values of MAE, RMSE and MSE [8].

In their research, Kaneko and Asahi employed SVMs as a predictive model to forecast the future movement of the Nikkei index over three different time horizons: one day, one week, and one month. The study employed the historical rates of change of US stock prices and the Nikkei Stock Average as explanatory variables. Based on the findings of the investigation, it was determined that the predictive precision of the mean price of the Nikkei index for the subsequent day exhibits persistent enhancement in comparison to random forecasting [9].

The present investigation by Gülmez examined the application of the Artificial Rabbits Optimization (ARO) method in combination with LSTM, a deep learning model. Objective of this research was to examine the utilization of this integrated methodology in the field of stock price forecasting. The research employed the stock price data of the Dow Jones Industrial Average (DJIA) index in order to carry out the forecasting procedure. The study performed a comparative analysis of the LSTM-ARO model in comparison to other models to evaluate its performance. The supplementary models consist of an artificial neural network (ANN) model, three separate LSTM models, and an LSTM model enhanced through the utilization of a Genetic Algorithm (GA). The performance of the models was compared by a comparative study, which involved the examination of several metrics such as MSE, MAE, MAPE and R<sup>2</sup>. The study's results revealed that the LSTM-ARO model had a higher level of predictive ability in comparison to the alternative models [10].

İlkçar utilized machine learning methodologies to predict the stock prices of Turkish Airlines in their research. The research utilized a range of deep learning methodologies, such as LSTM, Feedforward Neural Network (FNN), and Gated Recurrent Unit (GRU). The study encompassed the training and evaluation of diverse neural network architectures specifically engineered to capture and represent both short-term and long-term memory functionalities. The evaluation of the models' performance was conducted by utilizing various metrics, including R-squared, MSE, RMSE and MAE. The results suggest that the system demonstrates a performance of 97% for FNN, and 99% for LSTM and GRU, as evaluated using the test R-squared performance metrics. The results emphasize the potential of machine learning as a valuable tool for enhancing decision-making processes in the prediction of sequential data sets. Moreover, the research results suggest that machine learning methods, including FNN, LSTM, and similar algorithms, demonstrate considerable potential in accurately forecasting indices related to the air transportation sector [1].

A study by Almaafi et al. compared and evaluated the ARIMA and XGBoost models' forecasting capabilities for Saudi Telecom Company's weekly closing stock prices. The study's findings indicate that the XGBoost model outperformed the ARIMA model in terms of all evaluation measures. The findings demonstrate how well machine learning techniques predict stock market prices. Furthermore, this serves as an illustration of the limitations present in traditional statistical models when trying to predict fluctuations in stock prices, while highlighting the capability of machine learning techniques to reveal hidden links and patterns in datasets [11].

Dezhkam and Manzuri developed a novel model called "HHT-XGB" for predicting the closing values of stocks in the future. The suggested model incorporates the Hilbert-Huang Transform (HHT) for feature engineering and utilizes XGBoost as a classifier to identify close price trends. The categorization output represents a rating system that assesses the performance of stocks, enabling the optimization of portfolio weights for equities exhibiting superior trading performance. The study's findings indicate that the portfolios optimized within the scope of this research had superior performance compared to the portfolios designed only based on raw financial data, with a notable outperformance of 99.8%. In addition, empirical analysis indicates that the HHT-XGB strategy exhibits superior performance compared to benchmark strategies, especially in periods of market underperformance [12].

### 3. Data and Methodology

In this study, 3433 days of data between 01.01.2010-05.09.2023 of Turkish Airlines Corporation (THYAO), the largest aviation company in Turkey, were used. The data were obtained from [www.investing.com](http://www.investing.com). The time series graph of stock price data is given in Figure 1.

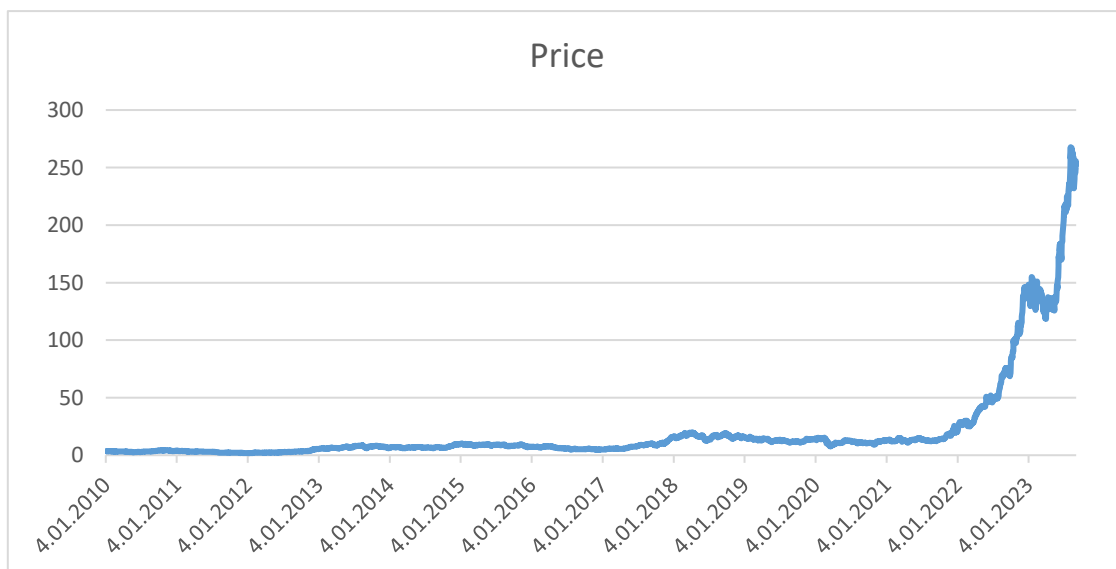


Figure 1. Time series of THYAO.



This study assesses the predictive performance of the proposed LSTM, XGBoost, and SVM models by evaluating metrics such as MSE, RMSE, MAE and R2. Equations 1, 2, 3, and 4 provide the appropriate mathematical expressions for the MSE coefficient, RMSE coefficient, MAE coefficient, and R2 coefficient, which are among the coefficients considered in this research.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \mu)^2} \quad (4)$$

### 3.1. LSTM model

Recurrent neural network-based LSTM models are well known for their efficiency at learning data with time-series characteristics or sequences [13,14]. An artificial neural network called an LSTM network uses LSTM units as its main building blocks, either in place of or in addition to other network units. The LSTM unit is a type of recurrent network unit that exhibits exceptional proficiency in retaining information over extended or brief time intervals. The crucial aspect of this capability is in the utilization of recurrent components that do not incorporate any activation function. Therefore, it can be observed that the stored value does not undergo iterative compression over a period of time, resulting in the gradient or blame term not tending to diminish when Backpropagation via time is employed for training purposes [15].

The normalization of the data sets was performed using the min-max method, as outlined in Equation (5), in order to establish a standardized range of values between 0 and 1.

$$x_{scaled} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5)$$

The forget gate in the LSTM approach is in charge of specifically discarding the previous sequence's cell state. The activation function  $\sigma_g$  processes the time series' current input, denoted by the symbol  $x_t$ , as well as its previous hidden state, denoted by the symbol  $h_{t-1}$ . The output vector  $f_t$ , which is related to the forget gate, is produced as a result of this processing. Equation (6) can be used to express this relationship mathematically.

$$f_t = \sigma_g (W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (6)$$

The bias coefficient is commonly denoted as  $b_f$ , whereas the weight coefficients associated with the forget gate are typically referred to as  $W_f$  and  $U_f$ . The activation function is denoted by the sign  $\sigma_g$ . The responsibility of the input gate is to regulate the influx of input data that is directed towards the active cell during a specific period. The coefficients  $i_t$  and  $C'_t$  in this gate are determined by the current time series input  $x_t$  and the hidden state  $h_{t-1}$  from the previous time step. The utilization of coefficients is crucial for the preservation of cell candidate data and the calculation of the proportion of information requiring updates. The utilization of the activation function is employed in the computation of these coefficients. The symbols  $W_i$ ,  $U_i$ ,  $W_c$ , and  $U_c$  represent the weight coefficients. The bias coefficients in Equations (7) and (8) are denoted as  $b_i$  and  $b_c$ , respectively. The activation functions are symbolized by  $\sigma_g$  and  $\sigma_c$ .

$$i_t = \sigma_g (W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (7)$$

$$C'_t = \sigma_c (W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (8)$$

The process of updating the cell state in a linear interaction approach entails two steps: first, updating the prior cell state, and second, combining this updated prior cell state into the present cell state to complete the information update. To be more precise, the cell state, represented as  $C_t$ , undergoes an update process where it is obtained by multiplying the output of the forget gate,  $f_t$ , with the previous cell state,  $C_{t-1}$ , and adding the product

of the output of the input gate,  $i_t$ , and the cell candidate data,  $C'_t$ . The computation provides the description of the updated cellular state,  $C_t$ , as stated in Equation (9).

$$C_t = f_t \times C_{t-1} + i_t \times C'_t \quad (9)$$

The computation and data transfer to the following time step are under the control of the output gate. Equation (10) illustrates how the activation function  $\sigma_g$  is applied to the input vectors  $h_{t-1}$  and  $x_t$  to produce the output vector  $o_t$ . The output gate controls the computation and data transfer to the subsequent time step. Equation (10) demonstrates the application of the activation function  $\sigma_g$  to the input vectors  $h_{t-1}$  and  $x_t$ , resulting in the generation of the output vector  $o_t$ .

$$o_t = \sigma_g(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (10)$$

The input gate is linked to the weight coefficients of the cell state,  $W_o$  and  $U_o$ , along with the bias coefficient,  $b_o$ . After that, the output gate produces the output  $o_t$ , which is subsequently multiplied by the current sequence cell state  $c_t$ . The outcome is subsequently subjected to the activation function  $\tanh$  in order to produce the ultimate output of the concealed layer, as indicated by Equation (11).

$$h_t = o_t \times \tanh(C_t) \quad (11)$$

### 3.2. XGBoost model

Chen and Guestrin developed the XGBoost method in 2016 [16]. The proposed method is derived from the Classification and Regression Tree (CART) algorithm. It introduces a novel approach to redefine the partition attributes and employs the minimization of the loss function to decide these attributes. One notable benefit of employing these methodologies is that the forecast is derived from empirical data. Boosting techniques have been found to yield efficient outcomes when used to regression and classification trees. XGBoost has demonstrated efficacy in generating accurate predictions and offers computational advantages over many alternative machine learning approaches. According to Abar, this feature possesses the capability to be utilized efficiently in various applications such as classification, consumer behavior prediction, motion detection, and advertising multidimensional big data analysis [17]. In order to predict the outcome for a dataset with  $n$  samples and  $m$  features, a tree ensemble model uses  $K$  additive functions  $D = \{(x_i, y_i)\} (|D| = n, x_i \in \mathcal{R}^m, y_i \in \mathcal{R})$ .

$$\hat{y}_i = \phi(x_i) = \sum_{k=1}^K f_k(y_i), f_k \in \mathcal{F} \quad (12)$$

In Equation (12),  $\mathcal{F}$  represents the space of regression trees,  $f_k$  is the quantity of weak learners, and  $K$  signifies the total count of weak learners.

$$\min L^{(t)}(y_i, \hat{y}_i^{(t)}) = \min(\sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^{(t)}) + \sum_{k=1}^t \Omega(f_k)) \quad (13)$$

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda w^2 \quad (14)$$

The algorithm's objective function at time  $t$ , denoted as  $L^{(t)}$ , is defined by Equation (13). The parameter  $l(y_i, \hat{y}_i^{(t)})$  represents many forms of loss functions that are employed to address certain challenges. It is commonly utilized to quantify the extent of discrepancy between the actual ( $y_i$ ) and the predicted ( $\hat{y}_i^{(t)}$ ) value and  $\sum_{k=1}^t \Omega(f_k)$  as a gauge of the overall complexity of the model, as presented in Equation (14).

$$\min L^{(t)} = \min(\sum_{i=1}^n [g_i f_t(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_t(x_i)] + \Omega(f_t)) \quad (15)$$

$$g_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}} l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) \quad (16)$$

$$h_i = \partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}}^2 l(y_i, \hat{y}_i^{(t-1)}) \quad (17)$$

The objective function is evaluated by substituting the predicted ( $\hat{y}_i^{(t)}$ ) of the  $i$ th sample in the  $t$ th iteration. The calculation is performed using the second-order approximation of the Taylor expansion at  $\hat{y}_i^{(t-1)}$ , as shown in Equation (15). In this, the variables  $g_i$  and  $h_i$  represent the first and second derivatives of the loss function  $l(y_i, \hat{y}_i^{(t)})$ , correspondingly.

$$w_j^* = -\frac{\sum g_i}{\sum h_i + \lambda} \quad (18)$$

$$obj^* = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^T \frac{(\sum g_i)^2}{\sum h_i + \lambda} + \gamma \cdot T \quad (19)$$

By substituting Equation (15), Equation (16), and Equation (17) into Equation (13), we may proceed to take the derivative. Solutions can be derived from Equations (18) and (19). Equations (18) and (19) denote the variable  $obj^*$ , which corresponds to the value of the loss function's score. A lower score indicates a more optimal tree structure. The symbol  $w_j^*$  denotes the solution of weights in the context being discussed.

### 3.3. SVM model

SVM algorithm is founded around the estimation of an optimal discriminative function for data classification, utilizing either a linear or non-linear function. The primary goal of SVM is to identify the ideal decision border that optimizes the margin between the boundaries of the different data classes. The method achieves this objective by detecting data points known as support vectors, which establish the boundaries for each class. SVM exhibit resilience to outliers and provide strong performance in feature spaces with a high number of dimensions. The kernel functions that are frequently employed in many applications encompass linear, nonlinear, polynomial, Gaussian kernel, radial basis function (RBF), and sigmoid [18].

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n (\zeta_i + \zeta_i^*) \quad (20)$$

$$(w\phi(x_i) + b) - y_1 \leq \varepsilon + \zeta_1 \quad (21)$$

$$y_t - (w\phi(x_i) + b) \leq \varepsilon + \zeta_i^* \quad (22)$$

In this context, the symbol  $w$  is used to indicate a direction vector, while "C" represents an adjustment factor. The variables  $\zeta_i$  and  $\zeta_i^*$  are referred to as slack variables. The function  $\phi(x_i)$  is used to transfer the input vector  $x_i$  to a high-dimensional hyperspace. The symbol "b" represents the intercept of the regression function, while  $\varepsilon$  is a coefficient that denotes non-sensitivity. The initial component of the objective function represents the level of complexity within the model, whereas the subsequent component represents the degree of error in fitting. In the theory of SVMs, the model achieves optimal performance when the sum is minimized. SVM models aim to achieve the optimal balance between the generalization performance of the model and its fitting performance.

The SVM model can be formulated as a quadratic programming problem in large dimensions. In order to mitigate the occurrence of a "dimensional disaster," the implementation of a kernel function is proposed as a means to transform high dimensional computational processes into low dimensional ones. Various types of kernel functions, including linear, RBF, Gaussian, polynomial, and other kernel functions, are frequently utilized. When processing high-dimensional complex samples, the RBF kernel outperforms the linear kernel. The parameterization of the RBF kernel function is also much simpler than that of the Gaussian and polynomial kernel functions. When choosing a solution for the SVM model, the RBF kernel is usually chosen as follows:

$$k(x, x_i) = e^{-g \|x - x_i\|^2} \quad (23)$$

The parameter  $g$  is employed to calibrate various distributions of samples.

## 4. Results and Discussion

The findings of the suggested LSTM, XGBoost, and SVM models are presented in Table 1. The present research utilized four statistical metrics. The evaluation tool employed to quantify the discrepancy between projected values and actual values is commonly known as RMSE. A lower score indicates a higher level of alignment between the model's predictions and actual observations. The mean of the squared deviations between

the expected and actual values is computed for calculating the MSE. The model's predictions exhibit more accuracy as the MSE decreases. The average magnitude of the variances between expected and actual values is quantified by the MAE metric. When the model's predictions are highly accurate, as indicated by a low mean absolute error (MAE), the impact of extreme data points is minimized. The fraction of the dependent variable's variance that can be quantified by the model is measured by the R2 statistic. When the coefficient of determination (R2 value) becomes close to 1, it means that the model can explain a sizable percentage of the observed variability.

**Table 1.** Statistical results of the models.

	SVM	XGBOOST	LSTM
<b>RMSE</b>	1.5925	1.5887	0.02431
<b>MSE</b>	2.5361	2.5241	0.00059
<b>MAE</b>	0.4796	0.4959	0.01572
<b>R2</b>	0.9983601	0.998368	0.990854

The outcomes of the performance criteria used to assess three different machine learning models are presented in Table 1. After doing a thorough examination of the data, it is evident that the SVM model demonstrates the subsequent numerical outcomes: RMSE of 1.5925, MSE of 2.5361, MAE of 0.4796, and an R-squared (R2) value of 0.9983601. In this particular instance, the root mean square error (RMSE) of 1.5925 signifies that the SVM model's predictions exhibit an average deviation of around 1.59 units from the actual values. The aforementioned figure signifies a significantly diminished magnitude of inaccuracy. The MSE score of 2.5361 signifies that, on average, the model's predictions exhibit a squared departure of 2.54 units from the actual data. MAE quantifies the average variation between predictions and true values, employing the absolute values of these variances. MAE score of 0.4796 suggests that the SVM model's forecast results exhibit an average variation of around 0.48 units from the actual values. This indicates a significant degree of mistake at a minimal level. The coefficient of determination (R2) quantifies the extent to which the model elucidates the variability in the independent variables. The R-squared value of 0.9983601 suggests that the SVM model has a high degree of accuracy in capturing the patterns present in the data, and effectively accounts for nearly all of the variability observed in the independent variables. The obtained R2 value is strong, suggesting that the model effectively accounts for the observed data.

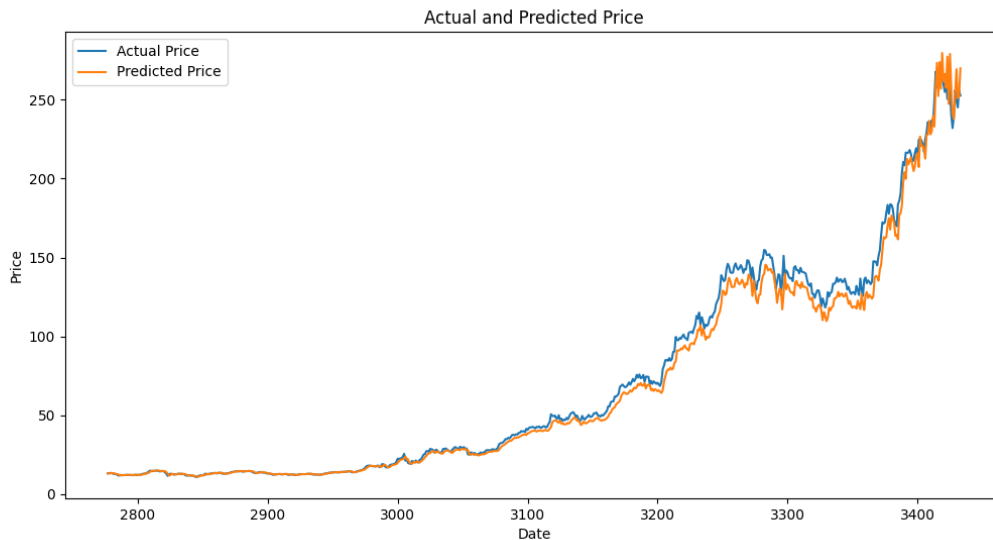
The root MSE, RMSE of XGBoost, which is 1.5887, suggests that, on average, the model's forecasts exhibit a deviation of around 1.59 units from the true values. This indicates a relatively minimal degree of error. The MSE score of 2.5241 signifies that the model's predictions exhibit an average squared deviation of 2.54 units from the actual data. The R-squared value of 0.998368 suggests that the XGBoost model has a high degree of accuracy in fitting the data, effectively accounting for nearly all of the variability observed in the independent variables. The high R2 value observed in this analysis suggests that the model effectively accounts for the variability in the data.

RMSE value of the LSTM model, which is 0.02431, signifies that the average deviation between the predicted and the actual values is merely 0.024 units. The MSE value of 0.00059 suggests that, on average, the model's forecasts exhibit a deviation of approximately 0.00059 units squared from the actual values. MAE score of 0.01572 signifies that the LSTM model's predictions exhibit an average variance of merely 0.015 units from the actual data. The R2 value of 0.990854 suggests that the LSTM model exhibits a high degree of accuracy in capturing the patterns present in the data and effectively accounts for a significant percentage of the variation in the independent variables. The strong R2 value suggests that the model effectively accounts for the variability observed in the data.

Upon doing a comprehensive analysis of Table 1, it is evident that the SVM model demonstrates a notable proficiency in minimizing errors across many metrics, including RMSE, MSE, MAE. The coefficient of determination R2 exhibits a remarkably high value, indicating a strong explanatory power in relation to the observed data. This showed that the SVM model has a high level of performance. The performance metrics of the XGBoost model is comparable to that of the SVM. The root MSE, RMSE, MSE, and mean absolute error (MAE) exhibit somewhat elevated values, while the R-squared R2 number demonstrates a substantial degree of explanatory power, indicating a strong fit to the data. The LSTM model demonstrates a notable reduction in errors when evaluated using the root MSE, RMSE, MSE, and MAE metrics. Nevertheless, the R2 value of the

aforementioned model is marginally inferior to that of the SVM and XGBoost models, indicating a slightly lesser degree of explanatory power in relation to the data. In order to determine the most effective model, it is necessary to take into account all of the metrics. The coefficient of determination (R2) provides a measure of the extent to which the model explains the observed data. On the other hand, RMSE, MSE and MAE serve as indicators of the accuracy of the model's predictions. In this analysis, all three models demonstrate relatively high R2 values, indicating a strong level of explanatory power in relation to the observed data. Nevertheless, the LSTM model demonstrates superior predictive accuracy compared to other models, as seen by significantly fewer errors in metrics such as RMSE, MSE, and MAE. Consequently, the LSTM model demonstrates superior predictive performance as evidenced by its notably lower values of RMSE, MSE, and MAE, as derived from the available data.

Based on the findings of the examination, it is seen that the LSTM model demonstrates superior performance when evaluating the performance measures, despite a slightly lower R2 value. Figure 2 depicts the extent to which the proposed LSTM model's predictions align with the observed data. This study applies LSTM, XGBoost, and SVM models to analyze the THYAO stock traded in BIST100. The study utilized a total of 3433 daily data points of THYAO between the dates of April 1, 2010, and May 9, 2023. The assessment of the prediction capabilities of the suggested models involved the utilization of statistical measures such as RMSE, MSE, MAE, and R2. The LSTM model demonstrates superior performance across all error statistics when evaluating the derived performance measures.



**Figure 2.** Actual and predicted values for LSTM model

As a result, it can be said that when it comes to accurately forecasting the values of publicly traded companies on stock exchanges, the LSTM model outperforms the SVM and XGBoost models. The study's conclusions will produce useful recommendations that will be advantageous to both individual and institutional investors. In prospective researches, it is possible to examine the outcomes derived from diverse time series, machine learning, and deep learning algorithms, including ARIMA, CNN, RBF, MLP, RF, and Decision Trees. The suggested approach has the potential for generalization through its application to various data sets. Furthermore, it should be noted that this study exclusively utilizes the THYAO stock price as the sole variable in the model. In prospective investigations, supplementary factors such as interest rates, inflation, and currency rates, which exert an influence on stock prices, may be incorporated.

## References

- [1] İlkçar, M. (2023). Turkish Airlines BIST share price prediction with deep artificial neural network considering trading volume and seasonal values. *International Journal of InformaticsTechnologies*, 16(1), 43-53.
- [2] Çınaroğlu, E, Avcı, T. (2020). Prediction of THY stock value with artificial neural networks. *Atatürk University Journal of Economics and Administrative Sciences*, 34(1), 1-19.
- [3] Tokmak, M. (2022). Stock price prediction using Long-Short-term memory network. *Mehmet Akif Ersoy University Journal of Applied Sciences*, 6(2), 309-322.
- [4] Fenghua, WEN, Jihong, XIAO, Zhifang, HE, Xu, GONG. (2014). Stock price prediction based on SSA and SVM. *Procedia Computer Science*, 31, 625-631.
- [5] Pawar, K, Jalem, RS, Tiwari, V. (2019). Stock market price prediction using LSTM RNN. In *Emerging Trends in Expert Applications and Security: Proceedings of ICETEAS 2018* (pp. 493-503). Springer Singapore.
- [6] Yang, Y, Wu, Y, Wang, P, Jiali, X. (2021). Stock price prediction based on xgboost and lightgbm. In *E3s web of conferences* (Vol. 275, p. 01040). EDP Sciences.
- [7] Kanakam, R, Ramesh, D, Mohmmad, S, Shabana, S, Prakash, TC. (2022, May). Stock price prediction using multiple linear regression and support vector machine (regression). In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2418, No. 1). AIP Publishing.
- [8] Vuong, PH, Dat, TT, Mai, TK, Uyen, PH. (2022). Stock-price forecasting based on XGBoost and LSTM. *Computer Systems Science & Engineering*, 40(1).
- [9] Kaneko, T, Asahi, Y. (2023). The Nikkei Stock Average Prediction by SVM. In *International Conference on Human-Computer Interaction*, 211-221.
- [10] Gülmez, B. (2023). Stock price prediction with optimized deep LSTM network with artificial rabbits optimization algorithm. *Expert Systems with Applications*, 227, 120346.
- [11] Almaafi, A, Bajaba, S, Alnori, F. (2023). Stock price prediction using ARIMA versus XGBoost models: the case of the largest telecommunication company in the Middle East. *International Journal of Information Technology*, 15(4), 1813-1818.
- [12] Dezhkam, A, Manzuri, MT. (2023). Forecasting stock market for an efficient portfolio by combining XGBoost and Hilbert–Huang transform. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 118, 105626.
- [13] Schuster, M, Paliwal, K. (1997), Bidirectional recurrent neural networks. *IEEE Trans. Signal Process.* 1997, 45, 2673–2681.
- [14] Hochreiter, S, Schmidhuber, J. (1997), Long Short-Term Memory. *Neural Comput.* 1997, 9, 1735–1780.
- [15] Chen, X, Wei, L, Xu, J. (2017). House Price Prediction Using LSTM. <http://arxiv.org/abs/1709.08432>
- [16] Chen, T, Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 13-17-Aug, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- [17] Abar, H. (2020). Estimation of Gold Prices by Xgboost and Mars Methods. *Ekev Academy Journal*, (83), 427-446.
- [18] Bakiler, H. (2023). Classification of gases with deep network based attributes and regression analysis of concentration values. *Başkent University Institute of Science and Technology Unpublished Doctoral Thesis,2023*

## Mimarlık Öğrencilerinin Sanal Gerçeklik Ortamında Safranbolu Tabakhanesinde Rölöve Alma Deneyimi

Muhammed Yusuf KÜÇÜKKARA<sup>1\*</sup>, Kasım ÖZACAR<sup>2</sup>, Yasin ORTAKCI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Sakarya, Türkiye

<sup>2,3</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

\*<sup>1</sup> muhammedkucukkara@subu.edu.tr, <sup>2</sup> kasimozacar@karabuk.edu.tr, <sup>3</sup> yasinortakci@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 04/07/2023;

Kabul/Accepted: 25/10/2023)

**Öz:** Doğal afetler ve insan kaynaklı tahribatlar sebebi ile zarar gören tarihi yapılar ilk haline en yakın bir görünüme kavuşacak şekilde restore edilmektedir. Aynı zamanda mimarlık öğrencileri bu yapılar üzerinde restorasyon süreçlerini öğrenmek için araştırmalar yapmakta ve bilgi toplamaktadır. Fakat erişebilirliği kısıtlayan pandemi, hastalık, tehlike ve olumsuz hava gibi koşullar öğrencilerin bu yapılara erişmelerini engellemektedir. Bu çalışma, mimarlık öğrencilerinin restorasyon derslerinde tarihi yapıları inceleme sırasında yaşadıkları erişim zorluklarını Sanal Gerçeklik (SG) teknolojisinden faydalanarak gidermeyi ve özellikle öğrencilere uzaktan erişimle, restorasyon dersindeki ölçme tekniklerini sanal ortamda uygulamalı olarak öğretmeyi amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında, restorasyon öncesi veri toplama işlemi tamamlanmış olan Tarihi Safranbolu Tabakhane Binası gerçek ölçüleri ile modellenmiş ve sanal gerçeklik ortamına aktarılmıştır. Öğrencilerin bu binada etkileşimli olarak beraber çalışabilmeleri için geleneksel ölçme araçları olan metre, su hortumu, şakül ve yazı tahtasının sanal versiyonları sisteme entegre edilmiştir. Böylece mimari restorasyon alanında literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı olarak, birden fazla öğrencinin fiziksel olarak farklı ortamlarda olmalarına rağmen aynı ortamdaymış gibi eş zamanlı olarak birbirleriyle etkileşimde bulunduğu, sesli ve görsel iletişim kurabildikleri sanal bir eğitim ortamı oluşturulmuştur. Kullanıcı deneyi sonrası yapılan anketlerde, öğrencilerin geliştirilen yönteme genellikle olumlu bakış açısı sergiledikleri ve anketteki toplam 14 ifadenin puanlamasında sistemin %88,62'lik bir puan ortalamasına ulaştığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar, sanal gerçekliğin yüz yüze eğitime ulaşımın olmadığı durumlarda, restorasyon derslerine yönelik uygulamalı bir eğitim fırsatı sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Restorasyon, rölöve eğitimi, sanal gerçeklik, etkileşim teknikleri, çok kullanıcı etkileşim.

### Building Surveying Experience of Architecture Students in Safranbolu Tannery using Virtual Reality

**Abstract:** Historical buildings damaged due to natural disasters and man-made destruction are restored to have the most similar appearance to their original state. At the same time, architecture students conduct research and gather information on these buildings to learn about the restoration process. However, conditions such as pandemics, diseases, dangers, and adverse weather conditions that restrict accessibility prevent students from accessing these buildings. This study aims to overcome the access difficulties experienced by architecture students during the examination of historical buildings in the restoration courses by utilizing Virtual Reality (VR) and especially to teach the measurement techniques in the restoration course in a virtual environment with remote access. Within the scope of the study, the Historic Safranbolu Tannery Building, whose data collection process was completed before restoration, was modeled with its actual dimensions, and transferred to the VR environment. For students to work together interactively in this building, we implemented virtual versions of traditional measuring tools such as tape measure, water hose, plumb and whiteboard into the system. Thus, unlike other studies in the literature in the field of architectural restoration, a virtual educational environment has been created in which multiple students interact with each other simultaneously as if they were in the same environment, despite being in physically different environments. In the post-experiment questionnaires, it was observed that the participants generally had a positive perspective on the developed method. The system achieved an average score of 88.62% across a comprehensive set of 14 statements within the questionnaire. These findings indicate that VR presents a valuable opportunity for practical training in restoration courses, particularly when face-to-face education is not accessible.

**Key words:** Restoration, building surveying education, virtual reality, interaction techniques, multi-user interaction.

\* Sorumlu yazar: [muhammedkucukkara@subu.edu.tr](mailto:muhammedkucukkara@subu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-0600-3651, <sup>2</sup> 0000-0001-7637-0620, <sup>3</sup> 0000-0002-0683-2049

## 1. Giriş

Sanal gerçeklik (SG) teknolojisi, tarihi koruma ve mimari restorasyon eğitimi alanlarında büyük bir potansiyele sahiptir. Doğal afetler ve insan kaynaklı hasarlar çoğu zaman tarihi yapıları tahrip ederek varlıklarını yavaş yavaş ortadan kaldırıyor. Sonuç olarak, bu binalar mevcut tarihi veriler ve belgelerle orijinal formlarına ve görünümüne uygun olarak titizlikle yeniden inşa edilmektedir [1]. Mimarlık öğrencileri, akademik müfredatları dahilinde, öncelikle tarihi yapılarda olmak üzere restorasyon süreci için kapsamlı araştırma ve veri toplama faaliyetlerinde bulunurlar. Bununla birlikte, salgın hastalıklar, tehlikeler ve elverişsiz hava koşulları gibi faktörler, yerinde inceleme ve ölçüm yapma becerilerine sınırlamalar getirmektedir. Bu zorluklar sebebiyle SG, mimarlık öğrencilerinin uzaktan eğitime erişmelerini ve kendilerini gerçek ölçümlere göre doğru bir şekilde görselleştirilen tarihi yapılarda çalışma yapmalarını sağlayan etkili bir araç olarak ortaya çıkmaktadır [2, 3]. Dahası, SG teknolojisi, öğrencilerin bu gerçekçi modellere dayalı etkileşimli derslere aktif olarak katılmalarını sağlayan bir dizi geliştirme aracı sunmaktadır. Aynı zamanda, mimari restorasyon eğitimi, kültürel mirası gelecek kuşaklara taşımak ve tarihi dokunun sürdürülmesi için temel taş olarak durmaktadır [4]. Mimarlık eğitimi müfredatında yer alan restorasyon dersleri, öğrencilerin tarihi ve kültürel mirasın değerini anlamalarını ve restorasyon süreçlerini etik ve uzman bir bakış açısıyla yönetmeyi öğrenmelerini amaçlamaktadır. Bu bağlamda, Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi'nin (ICOMOS) [5] mimari restorasyon eğitimine ilişkin ilkeleri doğrultusunda, kültürel mirasın korunmasına katkıda bulunacak restorasyon uzmanlarının yetiştirilmesi için bir temel oluşturmaktadır.

Mimarlık öğrencileri dersleri kapsamında tarihi yapıları analiz eder, bulguları belgeler, malzeme ve teknikleri inceler ve restorasyon projeleri hazırlar. Teorik bilgileri pratik uygulamalarla birleştiren öğrenciler, tarihi dokunun korunmasına ve aktarılmasına katkıda bulunur. Bu süreçte, öğrenciler mimari mirası koruma ve restorasyon konularında yetkin profesyoneller haline gelirler. Yapı analizi ve belgeleme sürecinde, öğrenciler tarihi yapıların mevcut durumunu analiz eder ve detaylı belgeleme çalışmaları yaparlar. Bu aşamalarda, yapıların planlarını, kesitlerini ve cephe çizimlerini hazırlarlar. Var olan yapıyı inceleyerek hazırladıkları eskizler üzerine aldıkları ölçüleri aktarırlar. Bu ölçümleri yaparken geleneksel sistemde metre, su terazisi ve şakül gibi araçları kullanırlar.

Literatürde sanal gerçeklik teknolojisi ile yapılmış çalışmalar [6–9], genellikle restore edilen yapının sadece görselleştirilmesi ve kullanıcılara sanal tur imkanı ile sunulmasını konu edinmiştir. Bununla birlikte, farklı alanlarda uygulamalı ve etkileşimli bir eğitim modeli sunan çalışmalar yer alsa da [10–12], mimari rölöve eğitiminde herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu eksikliği gidermek amacıyla bu çalışmada iki temel işlem gerçekleştirilmiştir:

- Tarihi binaların sanal gerçeklik ortamına aktarılması.
- Mimarlık öğrencilerinin restorasyon derslerindeki saha ölçümleri için etkileşimli bir sanal gerçeklik ortamının oluşturulması.

Bu kapsamda, alan çalışması olarak Tarihi Safranbolu Tabakhane Binası seçilmiş ve yapının restorasyon öncesi veri toplama işlemi tamamlanmıştır. Bu veriler ışığında bina üç boyutlu olarak modellenerek, sanal gerçeklik ortamına aktarılmıştır. Daha sonra, mimarlık öğrencilerinin ölçüm yapabilmeleri için gerekli olan metre, su terazisi, şakül ve yazı tahtası gibi temel araçların sanal versiyonları geliştirilmiş [13] ve Tarihi Safranbolu Tabakhane Binası'nda ölçüm işlemleri için ortama entegre edilmiştir. Birden fazla öğrenci bu sanal ortamda eş zamanlı olarak hareket edebilmekte ve beraber ölçüm yapabilmektedir. Öğrenciler, bu ortamda avatarlarla temsil edilirken, birbirlerinin bütün hareketlerini görerek görsel iletişim kurabilirler. Aynı zamanda birbirleri ile sesli iletişim de kurarak yüz yüze eğitimde sahip oldukları bütün olanaklara erişebilmektedirler. Yapılan çalışmada, restorasyon ile ilgili derslerin sanal ortamda gerçekleştirilmesine yönelik geliştirdiğimiz modelin verimliliği ve etkinliği öğrenci deneyimleri ile ölçülmüştür.

## 2. Literatürdeki Benzer Çalışmalar

Dünya genelinde ve ülkemizde pek çok tarihi yapının sanal gerçeklik ortamına aktarılması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Literatürdeki bazı çalışmalar, restorasyon öncesi veri toplama işlemini ve yapıların mevcut hallerinin modellenerek sanal gerçeklik ortamına aktarılmasını ele almaktadır.

### 2.1. Sanal gerçeklik ve interaktif yapı görselleştirmesi

Walmsley vd. [14], Königsutter'deki İmparatorluk Katedrali için bir Sanal Gerçeklik (SG) uygulaması geliştirmiştir. Bu uygulama, lazer tarama ve 360° panoramik fotoğrafçılığın birleştirilmesiyle bilgi açısından zengin etkileşimli 3-boyutlu (3B) içerikler oluşturabilme potansiyelini göstermiştir. Fukuda vd. [8], yüksek



çözünürlüklü bir SG uygulaması geliştirmek için Azuchi Kalesi ve kasabasını modellemişlerdir. 286 kişi üzerinde test edilen uygulamanın yapılan değerlendirmesinde, katılımcıların büyük çoğunluğu uygulamayı 'Çok İyi' veya 'İyi' olarak nitelendirmiştir. Hrozek vd. [15], Köstice Devlet Tiyatrosu'nu 3B modelleyerek yapıyı sanal ortama aktarmış, bu modeli projeksiyon ve bilgisayar monitörleri üzerinden kullanıcılara sunmuştur. Ferwati ve Menshawy [7] tarafından Katar'daki Zübare Harabesi'nin modellenmesi yapılmıştır. Bu süreç, şehrin kentsel yapısı, mimari tarzı ve orada yaşayanların hayatları hakkında yeni bir perspektif sunmuştur. Kersten vd. [16], "Alt-Segeberger Bürgerhaus" adlı tarihi bir yapının ve müzesinin sanal modelini 3B lazer tarama teknolojisi kullanılarak oluşturmuş ve interaktif hale getirmiştir. Katılımcılar sanal müzeyi denemiş ve büyük çoğunluğu uygulamayı beğendiklerini belirtmişlerdir. Arrighi vd. [6], Avustralya'nın Newcastle kentindeki Victoria Tiyatrosu'nu dijitalleştirmiştir. Yapılan anket çalışmasında, kullanıcıların uygulama hakkında genel olarak olumlu bir izlenim edindikleri görülmüştür. Erbaş ve Tuncel [17], Yerebatan Sarnıcı'nın dijital modellemesini ve oyun motorları aracılığıyla sanal gerçeklik ortamına aktarılmasına yönelik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışma ile Yerebatan Sarnıcı'nın bir bölümü dijital sergi olarak kullanıcılara sunulmuştur. De Paolis vd. [18], Güney Murgia Klasik Öncesi Medeniyetler Müzesi için kullanıcılara Üst Paleolitik döneme ait yerleşimleri keşfetme ve eski eserlerle etkileşim kurma imkanı sunmuştur. Çalışma kapsamında kullanıcıların uygulama hakkındaki değerlendirmelerini almak için bir kullanıcı deneyim anketi uygulanmış ve anket sonuçlarına göre, uygulamanın görsel/işitsel doğruluk açısından yüksek seviyede performans gösterdiği ortaya konmuştur.

## 2.2. Sanal gerçeklikle mimari eğitim

Şahbaz [19], öğrencilerin mimari detayları öğrenebilecekleri ve tarihi yapıların mekânsal etkilerini yerindeymiş gibi deneyimleyebilecekleri bir ortam oluşturmuş ve bu konuda deneyler yapmıştır. Bashabsheh ve diğerleri [20], inşaat aşamalarının yönetimi için tasarladıkları bir yazılım ile inşaat yapım aşamalarını 4B (3B model ve zaman boyutu) sunarak kullanıcılara hem sürükleyici (immersive) hem de sürükleyici olmayan bir ortamda sanal gerçeklik deneyimi sunmuştur. Williams vd. [21], tasarım stüdyolarına sanal gerçeklik teknolojisini entegre etmiş ve Western Kentucky Üniversitesi'ndeki mimarlık öğrencileri için bir sanal gerçeklik laboratuvarı kurmuşlardır. Erkan [22], öğrencilerin mimari bileşenleri ve bileşenler arası ilişkileri inceleyebilecekleri etkileşimli ve katılımcı bir eğitim ortamında SG teknolojisini teorik olanaklarını araştırmıştır. Aboushal vd. [23], mimarlık eğitiminin geleceğini daha nitelikli ve daha akıllı hale getirmek için sanal gerçeklik teknolojisini uygulanmasını önermiştir. Ibrahim vd. [24], SG teknolojisini kullanılmasının öğrencilerin mimarlık tarihi öğrenme becerileri üzerindeki etkisini incelemiştir. Jenek vd. [25], Avustralya ve Almanya'daki mimarlık okullarında Medya Mimarisi tasarımında sürükleyici teknolojilerin kullanımına odaklanmışlardır. Anifowose vd. [26], tasarım pedagojisinin geometrik soyut kavramlarını geliştirmenin, oyun içeriği ve seviyeleri için değişen ayrıntı düzeyleri kullanmanın ve montaj sırasında kullanıcı katılımını artırmak için "snap-to-grid", "snap-to-position" ve "snap-to-angle" gibi yeni geliştirilen özellikleri kullanmanın mimari emsal çalışması için daha derin öğrenme hedefleri sağlayabileceğini göstermiştir.

Genel olarak, tarihi yapıların SG ortamında modellenmesi, uygulamaya dayalı ve etkileşimli öğrenme imkanları sunmaktadır [27]. Sanal gerçeklik teknolojisi, bina inşaatı ve mimari tasarımları görselleştirme ve bunlarla etkileşim kurma aracı olarak son yıllarda büyük ilgi görmüştür. SG, kullanıcıların bu alanlardaki çeşitli sorunlara ve zorluklara verimli bir çözüm sunarak, sanal ortamları deneyimlemelerine olanak tanımaktadır. Yapıların gerçeğe uygun oluşturulmuş SG modelleri tarihi yapıların restorasyonunda uygulayıcılara bir rehber araç olarak kullanılabilir. Bu teknoloji, mevcut bilgi ve verileri kullanarak 3B modeller oluşturur. Bu modeller, sanal bir ortamda görselleştirilir ve kullanıcılar bu modelleri gerçek hayat boyutlarında deneyimler.

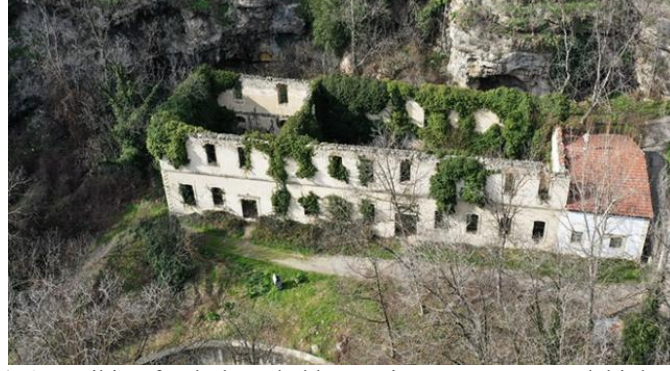
Sanal gerçeklikteki bu gelişmeler ışığında bizim çalışmamız literatürdeki mimari çalışmalardan farklı olarak etkileşimli bir öğrenme ortamı sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar genel olarak tarihi yapıların görselleştirilmesini ve bu görselleştirmeler üzerinde çok kısıtlı etkileşimlerle eğitim amaçlı kullanılmasını içermektedir [6-9]. Halbuki mimarlık öğrencilerinin konuları daha iyi öğrenebilmeleri için ölçüm işlemlerini bu ortamlarda gerçekleştirebilmeleri gerekmektedir. Bu kapsamda çalışmamız öğrencilere çok kullanıcı bir öğrenme ortamı sunmakta ve eş zamanlı olarak 3B sürükleyici bir ortamda hem görüntüleme hem de sanal araçlarla ölçüm yapma olanağı sağlamaktadır. Ayrıca, uygulamada öğrenciler farklı fiziksel konumlarda olsalar bile sisteme bağlanarak birbirleriyle sesli iletişime geçebilmekte ve gerçekçi avatarlarla görsel etkileşimde bulunabilmektedirler. Bu özelliğiyle geliştirdiğimiz sistem yüz yüze eğitim şartlarının olmadığı durumlarda mimarlık öğrencilerinin rölöve eğitimindeki pratik yapma ihtiyacını gidermeye imkan tanımaktadır. Kullanıcı deneyimi olarak, öğrenciler gerçek ölçülerde modellediğimiz tarihi yapıda gezinmenin yanı sıra sanal araçlarla ölçüm yapabilmekte ve oluşturdukları taslakları yazı tahtasına aktarabilmektedir.

### 3. Safranbolu Tabakhane Binasının SG Uygulamasının Geliştirilmesi

Bu çalışmada, günümüzde harap durumdaki ve mevcut hali Şekil 1’de gösterilen Tarihi Safranbolu Tabakhane Binası restorasyon projesine göre modellenmiş ve mimari restorasyon öğrencileri için bir ölçüm gerçekleştirme ortamı olarak kullanılmıştır.

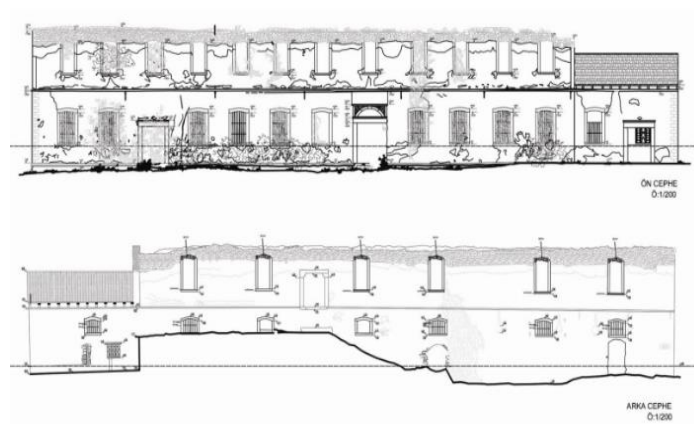
#### 3.1. Üç Boyutlu modelin oluşturulması

Tarihi Safranbolu Tabakhane Binası, bölgenin ilk tabakhane yapılarından biri olarak kabul edilir. Yapı 1920 yıllarında kurulmuş ve uzun yıllar boyunca Kastamonu'nun deri ihtiyacını karşılayarak önemli bir sanayi tesisini oluşturmuş, ancak sonraları demir-çelik gibi yeni sektörlerin gelişimi ve ekonomik dalgalanmalar nedeniyle kapanmıştır. Bölgenin turistik yapılarından biri olarak yıllardır restore edilmeyi bekleyen ve restorasyon öğrencileri için önemli bir uygulama alanı olan bu yapı, çalışmamızda örnek model olarak seçilmiştir. İki katlı olan bina, geçirdiği yangın nedeniyle döşemeleri ve çatısı yanmış ve şu anda harabe durumundadır. Yapının günümüzde dış duvarları, mekânı ikiye bölen iç duvarı ve iki kolonu mevcuttur. Yapıya bitişik olarak, geçmişte üretim sürecine destek sağlamak amacıyla inşa edilmiş tek katlı bir teknik servis binası bulunmaktadır. Yapının içinde ve cephesinde bitkilenmeler ve bozulmalar gözlemlenmektedir. Yapıya bitişik olan, geçmişte üretim sürecine destek sağlamak için yapılmış tek katlı teknik servis yapısının içinde ve cephesinde bitkilenmeler ve bozulmalar gözlemlenmektedir. Ayrıca, yapının üç adet girişi bulunmaktadır [28].



Şekil 1. Tarihi Safranbolu Tabakhane Binasının günümüzdeki durumu.

Yapının dijitalleştirilmesi için mevcut hali fotoğraflanarak kaydedilmiş, tarihi kaynaklar incelenmiş ve aynı dönemde inşa edilmiş diğer yapılarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapının mevcut durumuna şahitlik etmiş kişilerle görüşmeler yapılarak binayla ilgili bilgiler toplanmıştır. Literatürde, Şekil 2’de görülebileceği gibi, yapının çizimlerine ulaşılmış, eldeki bilgi ve belgeler ışığında Şekil 3’te verilen kesitler elde edilmiştir.



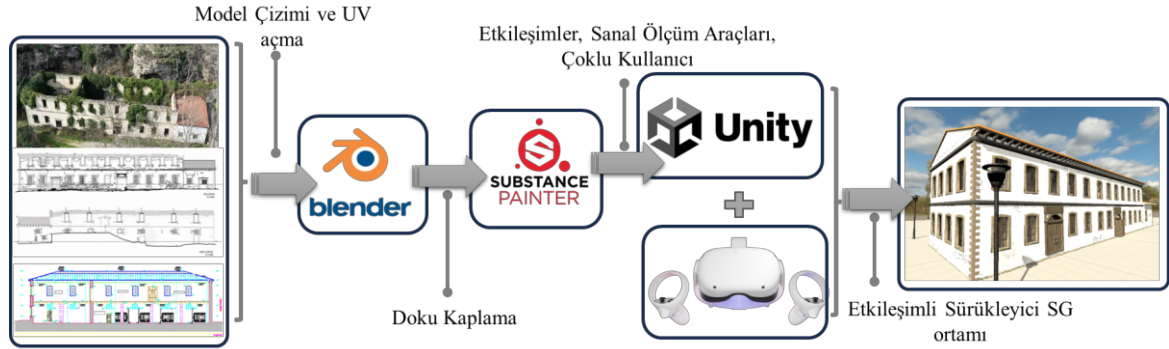
Şekil 2. Fidan tarafından hazırlanan yapının ön ve arka cephe rölöve çizimleri [28].



Şekil 3. Tabakhane yapısının restorasyon projesine ilişkin kesitler.

Yapı, Blender adlı açık kaynak ve ücretsiz bir bilgisayar destekli çizim aracı ile modellenmiştir. Model, yapı ölçüleriyle birebir uyumlu ölçülerde hazırlanmıştır. Gerçekçi bir kaplama oluşturmak için model, çizim aracında UV açma işlemine tabi tutulmuştur. UV açma, doku koordinatlarının belirlenmesine olanak tanır. Duvarlar, sütunlar, pencereler ve kapılar gibi nesnelerin ayrı ayrı UV'leri açılarak, kaplamaların modele tam olarak uyum sağlaması ve kullanıcıya gerçekçi bir deneyim sunması amaçlanmıştır. UV açma işlemi tamamlandıktan sonra kaplama oluşturma aşamasına geçilmiştir. Yapıya en uygun dokular, Adobe Substance Painter© kütüphanesinden seçilmiştir. Kullanıcı deneyimini zenginleştirecek şekilde ışık ve gölge ayarları yapılmıştır. Modelleme sürecinden SG uygulamasına kadar yapılan uygulama geliştirme iş akışı Şekil 4'te verilmiştir.

### 3.2. Sanal gerçeklik uygulaması



Şekil 4. Uygulama geliştirme iş akışı.

Bu uygulamada, öncelikle tarihi Safranbolu Tabakhane Binasının gerçek boyutlarında bir sunumu gerçekleştirilmiştir. Unity© içerisinde materyallerin ayarları yapılarak gerçeğe uygun bir görünüm elde edilmiştir. Bu aktarım gerçekleştirildikten sonra, model çalışma alanına yerleştirilmiş ve ışıklandırma ayarları yapılmıştır (Şekil 5). Bir sonraki aşamada, mimari restorasyon öğrencilerine yönelik bir eğitim modeli oluşturulmuştur. Bu eğitim modeli sayesinde, öğrenciler çok kullanıcı bir ortamda restore edilmiş tarihi Safranbolu Tabakhane Binası'nı inceleyebilir ve ölçüm faaliyetlerinde bulunabilir. Ölçüm yaparken, araçlarla etkileşim kurarak çizimler gerçekleştirebilir. Ayrıca, çok kullanıcı ortamında sesli iletişim imkanına sahip olacaklar ve sanal ortamdaki konumlarını belirlemek için avatar sisteminden yararlanmaktadırlar.



(a)



(b)

Şekil 5. Tabakhane Binasının üç boyutlu modelinin dış (a) ve iç (b) görüntüsü.

### 3.2.1. Etkileşimler

SG uygulamasındaki etkileşimleri sağlamak amacıyla uygulamaya Mixed Reality ToolKit© (MRTK) yazılım çerçevesi entegre edilmiştir. MRTK, oyun motorlarına entegre edilebilen, platformlar arası karma gerçeklik uygulamalarını geliştirmeyi hızlandıran ve çeşitli bileşenler ile özellikler sunan bir araçtır [29]. Bu araç sayesinde kullanıcıların, modeldeki objelerle (pencere ve kapı) ve sanal ölçüm araçlarıyla ile etkileşime girmesi mümkün kılınmıştır. Şekil 6’te görüldüğü üzere kullanıcıların daha iyi bir gezinti deneyimi yaşaması için ışınlanma (teleport) ile hareket etmeleri sağlanmıştır.



Şekil 6. Tabakhane Binasının içinde ışınlanma ile hareket.

Bu çalışmada, mimari restorasyon öğrencileri, ders kapsamında gerçekleştirdikleri ölçüm işlemlerini sanal ortamda da gerçekleştirebilmektedirler. Geliştirilen modül, öğrencilere iki nokta arasındaki uzaklığı ölçebilmeleri için sanal ortamda bir metre sunmaktadır (Şekil 7.a). Öğrenciler, bu metreyi tut-sürükle-bırak etkileşimiyle

kullanarak, iki nokta arasındaki mesafeyi ölçebilmektedir. Ölçüm tamamlandığında, metrenin şerit kısmında ölçülen mesafe görsel olarak sunulmaktadır. İki noktanın arasındaki mesafeyi hesaplamak için, öklidyen uzaklık kullanılmıştır.

Öğrencilerin kullandığı bir başka ölçüm aracı ise su terazisidir (Şekil 7.b). Su terazisi, ölçüm yapılacak alandaki yatay ekseni belirlemek yani kot alma işlemi için kullanılır. Öğrenci, su terazisinin uçlarından tutarak duvarlardaki eş yükselti noktalarını belirleyebilirler ve bu noktaları işaretleyebilirler. Böylece metre ile ölçüm yaparken kullanacakları referans noktalarını belirlemiş olurlar.

İki parçadan oluşan şakül aracı (Şekil 7.c) ise, tutamaç ve yer çekimi ile hareket eden gövde kısmını içerir. Bu araçla, öğrenciler yüksekteki objelerin yerdeki iz düşümünü bulur ve böylece dikey düzlemdeki eğimleri ölçebilir. Öğrenci, tutamaç kısmından tutarak şakülü tavandaki referans noktaya taşır. Şakülün gövde kısmı otomatik olarak zemine doğru hareket eder ve yere çarptığında durur. Öğrenci yerdeki referans noktasını işaretleyerek tavandaki noktanın zemindeki iz düşümünü bulur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7. Sanal ölçüm araçları: (a) metre, (b) su terazisi ve (c) şakül.

Yazı tahtası aracı, öğrencilerin binanın kaba çizimini yapmasını sağlamak ve ölçüm değerlerini not etmek amacıyla kullanılmaktadır. Sadece bir öğrenci tarafından kullanılabilen yazı tahtasında, öğrencinin elindeki kalem tahta yönünde kullanıcının eli ile hareket eder. Kalem tahtaya değdiğinde etrafında sarı bir vurgu tonlayıcı belirir ve çizim başlar. Benzer olarak, Şekil 7'de görüldüğü gibi diğer ölçüm araçları da öğrenciler tarafından kullanılmaya başlandığında bu sarı tonlayıcı belirir.

### 3.2.2. Çoklu öğrenci ve sesli iletişim desteği

Bu uygulamada, çok kullanıcı ve sesli iletişim desteği sağlamak için Photon© PUN2 kullanılmıştır. Photon Unity Networking (PUN), çok kullanıcı uygulamaları için geliştirilmiş bir Unity paketidir [30].



Şekil 8. Uygulama karşılama arayüzü.

Kullanıcı uygulamaya girdiğinde, ilk olarak karşılama arayüzüyle etkileşime girer (Şekil 8). Bağlantı butonunu seçtiğinde, kullanıcı sunucuya bağlanır. Sisteme bağlanan kullanıcılar eş zamanlı olarak sanal ölçüm araçlarını kullanabilir. Ölçümler sırasında kullanıcıların yer değişiklikleri, konuşma sesleri ve sanal araçlardaki ölçüm sonuçları gerçek zamanlı olarak diğer kullanıcılara iletilir (Şekil 9).



Şekil 9. Çoklu kullanıcı etkileşiminden bir örnek.

### 3.2.3. Kullanıcı avatarları

Kullanıcılara ortamda bulunma hissini artırmak ve birbirleriyle iletişimini desteklemek amacıyla Meta Avatar kütüphanesi kullanılmıştır. Meta Avatar milyonlarca kıyafet ve fiziksel özellik kombinasyonları ile kullanıcılara özelleştirilebilir avatarlar sunmaktadır [31]. Avatarlar ile kullanıcılar birbirlerinin sanal ortamdaki konumlarını görebilirler. Sistem kullanıcıların jest ve mimiklerini sanal avatarlara yansıtarak, bu sayede sesli iletişimlerini beden diliyle desteklemekte ve onlara gerçek ortamda iletişim kuruyormuş hissini vermektedir. Şekil 10'da uygulamamızda kullanılmış olan örnek bir avatar görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 10. Uygulamada kullanılan bir avatar görüntüsü.

#### 4. Kullanıcı Deneyleri

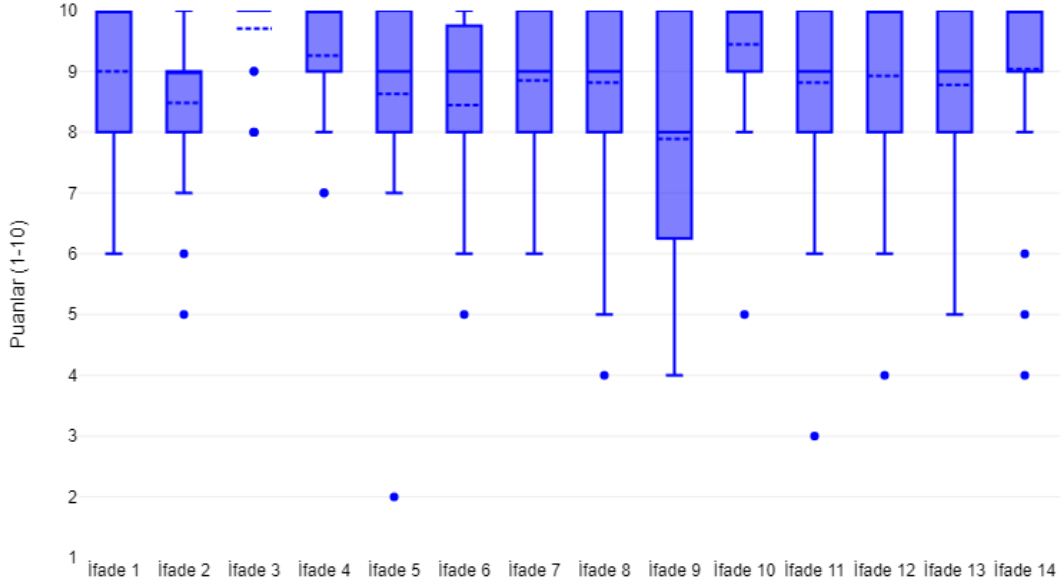
Çalışmada kullanıcı deneylerine daha önce alanda tarihi binalarda yerinde ölçüm yapmış 27 mimari restorasyon öğrencisi katılmıştır. Bu öğrenciler yüz yüze derslerde yaptıkları gibi üçer kişilik gruplara ayrılarak geliştirdiğimiz sanal sistemi 10'ar dakika test etmiştir. Dördüncü bir kişi olarak sanal ortamda bir öğretim görevlisi yer almıştır. Kullanıcılara deney başlamadan önce SG cihazı kullanımı ve uygulama hakkında 5 dakikalık bir bilgilendirme yapılmıştır. Deney sırasında kullanıcılara binayı incelemeleri ve geliştirilen araçlarla bina üzerinde ölçüm yapmaları istenmiştir. Ölçümler esnasında kullanıcılar geliştirilen tüm modülleri (ölçüm araçları, avatar, çok kullanıcı sistem, sesli iletişim vb.) kullanmışlardır. Test sonucunda kullanıcılara Tablo 1'de uygulamadaki etkileşimleri, sanal ölçüm araçlarının kullanım kolaylığını ve ortamın gerçekçiliği ile ilgili değerlendirmeleri içeren 14 maddelik bir anket uygulanmıştır. Bu anketin hazırlanmasında literatürdeki benzer çalışmalardaki [32] yaklaşımlar örnek alınmıştır. Cevaplar için 10 puanlı likert ölçeği kullanılmıştır. Ölçek kapsamında ankete verilen cevaplar 1 hiç katılmıyorum, 10 ise tamamen katılıyorum olarak değerlendirilmiştir. Çalışmaya katılan 27 katılımcının 13'ü kadındır. Tümünün yaş ortalaması ise 22,85'tir.

Tablo 1. Ankette kullanıcılara yöneltilen ifadeler

No	Açıklama
1	Sanal ortamın ölçüleri gerçekçiydi.
2	Ortamın görüntü kalitesi yüksekti.
3	Sistemi kullanmak eğlenceliydi.
4	Sistemi kullanmayı öğrenmek kolaydı.
5	Sistemdeki ölçüm görevlerini yapmak basitti.
6	Sistemin hızı yeterliydi.
7	Sistemin arayüzü kullanıcı dostuydu.
8	Sistem, bir ders aracı olarak yüz yüze eğitime göre daha motive edicidir.
9	Sistem, mimarlık eğitiminde yüz yüze eğitim modeline göre daha öğreticidir.
10	Sistem, mimarlık eğitiminde yüz yüze eğitime göre daha az yorucudur.
11	Sistemde sanal araçlar ile ölçüm yapmak gerçek cihazlar ile ölçüm yapmaktan daha kolaydı.
12	Sistemde ölçümleri yüz yüze eğitime göre daha hızlı gerçekleştirdim.
13	Sistemde öğrenciler yüz yüze eğitim modeline göre daha aktiftir.
14	Sistemde öğretim elemanları yüz yüze eğitim modeline göre daha aktiftir.

#### 4.1. Bulgular

Tablo 2, katılımcıların anketteki ifadelere verdikleri puanların ortalamasını, standart sapmasını göstermektedir. Anket sonuçları, katılımcıların geliştirdiğimiz sanal gerçeklik sisteminin genel performansını olumlu bulduklarını göstermektedir.



Şekil 11. Deney sonuçlarının kutu grafiği.

Şekil 11 her bir ifade için verilen puanların medyan, ortalama ve aykırı değerleri görselleştirmektedir.

- İfade 1'e göre, katılımcıların büyük bir kısmı ölçüleri 8 ile 10 arasında puanlamıştır. Bu sonuçlar sistemin ölçülerinin gerçekçi olduğunu göstermektedir.
- İfade 2'ye göre her ne kadar iki katılımcı sistemin görüntü kalitesini 5 ve 6 olarak puanlasalar da katılımcıların yarısı sistemin görüntü kalitesini 8 ve 9 olarak puanlamıştır.
- İfade 3 için katılımcıların vermiş olduğu 8 ve 9 puanları bile birer aykırı değer olarak ortaya çıkmıştır. Katılımcıların 22'si sistemin eğlenceli olmasını 10 tam puanla değerlendirmiştir.
- İfade 4'e göre kullanıcıların %75'i sistemin kullanım kolaylığını 9 ve 10 olarak puanlamıştır.
- İfade 5'e göre 1 kullanıcı sistemdeki ölçüm görevlerini yerine getirmeyi 2 gibi çok düşük bir puanla değerlendirirse bile bu görev tüm kullanıcılar tarafından ortalama 8,6 puanla değerlendirilmiştir.
- İfade 6'e göre sistem hız açısından kullanıcılardan ortalama 8,4 puan almıştır.
- İfade 7'de sistemin kullanıcı dostu bir arayüze sahip olduğu katılımcıların %75'inin bu ifadeyi 8 ile 10 arasında puanlaması ile görülmektedir.
- Diğer ifadelere göre daha geniş bir puan dağılımına sahip olan ifade 8'de sistem, yüz yüze eğitime göre daha motive edici olma konusunda 8,8'lik ortalama puanına ulaşmıştır.
- İfade 8'e benzer şekilde, ifade 9'un puanlanması da geniş bir dağılıma sahiptir. Sistemin bir ders aracı olarak yüz yüze eğitime göre daha öğretici olması 4 ile 10 arasında değişen puanlar almış ve medyanı 8 çıkmıştır.
- İfade 10'da sistemin yüz yüze eğitime göre daha az yoruculuğunu 1 öğrenci 5 ile puanlamıştır. Geriye kalan bütün öğrenciler bu ifadeyi 8 ile 10 arasında puanlamıştır.
- İfade 11'de bir kullanıcı sanal araçlarla ölçüm yapmayı gerçek araçlarla yapılandırılana göre 3 gibi düşük bir puanla daha zor bulurken, diğer kullanıcılar ortalama 8,8 ile sanal araçlarla ölçüm yapmayı daha kolay bulmuşlardır.
- İfade 12'de kullanıcılar %75'i sistemdeki ölçüm görevlerini yüz yüze eğitime göre daha hızlı bulmuşlardır.
- İfade 13 ve 14'te kullanıcılar sırası ile öğrencilerin ve öğretim elemanının etkinliklerini yüz yüze eğitime göre ortalama 8,8 ve 9,0 ile puanlamışlardır.

Genel olarak, sanal ortamın ölçüleri ve görüntü kalitesi katılımcıları tatmin ederken (İfade 1 ve 2), katılımcılar sistemin kullanımını eğlenceli ve öğrenmesi kolay (İfade 3 ve 4), sistemde ölçüm yapmayı basit ve sistemin hızını yeterli (İfade 5 ve 6), arayüzünün kullanımını kolay (İfade 7), yüz yüze eğitimle karşılaştırıldığında, daha motive edici ve konuları öğrenmek için kolaylaştırıcı bir araç olarak değerlendirmişlerdir (İfade 8, 9 ve 10). Katılımcılar,



sanal araçlarla ölçüm yapmanın gerçek cihazlarla ölçüm yapmaktan daha kolay ve hızlı olduğunu belirtmişlerdir (İfade 11 ve 12). Ayrıca, sistemi kullanırken kendilerinin ve öğretim elemanlarının daha aktif rol aldığını düşünmektedirler (İfade 13 ve 14).

Sonuç olarak, anket, sanal gerçeklik sisteminin mimarlıkta yüz yüze eğitime göre avantajlar sunabileceğini göstermektedir. Bu avantajlar daha iyi bir öğrenci ve öğretim elemanı etkileşimini, hızlı ve kolay ölçüm yapmayı ve yüksek motivasyon düzeyini içerir.

#### 4.2. Tartışma ve çıkarımlar

Uygulamaya aktarılan bina modeli, yapım aşamasında önemli ölçüde zaman maliyetine yol açmaktadır. Binanın bilgisayar ortamında modellenmesi için mevcut planlarının elde edilmesi ya da aktarılması ve bilgisayar destekli çizimin gerçekleştirilmesi süreçleri yerine, derinlik sensörü gibi alternatif modelleme teknolojilerinin kullanılmasıyla zaman maliyetinin azaltılması mümkün olabilir.

Sanal eğitim sisteminin mimarlık eğitimindeki kullanıcılardan genellikle olumlu geri bildirimler aldığı görülmektedir. Ankette, "1. Sanal ortamın ölçüleri gerçekçiydi" ifadesi katılımcılar tarafından yüksek puan alınırken, düşük standart sapma değeri göstermiştir. Bu durum bina modelinin gerçek ölçülere göre tasarlandığını ve yüksek kalitede kaplamalarla görselleştirildiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra sanal ölçüm araçlarının da doğru ölçümler yapacak şekilde geliştirildiği sonucuna varılmaktadır. Sistem hızı ve kullanıcı dostu arayüz de nispeten yüksek puanlar almıştır, bu da sistemin genel kullanılabilirliği ve işlevselliği açısından olumlu bir gösterge olarak yorumlanabilir. 3 numaralı "Sistemi kullanmak eğlenceliydi" ifadesi, diğer ifadelerle kıyasla en yüksek ortalama değeri ve en düşük standart sapmayı elde etmiştir.

Diğer yandan, "5. Sistemdeki ölçüm görevlerini yapmak basitti" ifadesi ortalama olarak diğerlerine göre daha düşük puan almış ve standart sapma değeri daha yüksek çıkmıştır. Yine "10. Sistem, mimarlık eğitiminde yüzyüze eğitime göre daha az yorucudur" ve "11. Sistemde sanal araçlar ile ölçüm yapmak gerçek cihazlar ile ölçüm yapmaktan daha kolaydı" ifadelerinde standart sapma, diğer ifadelerle göre daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar, sanal gerçeklik teknolojisi ile ölçüm görevlerini yapma konusunda bütün öğrencilerin aynı beceriye sahip olmadığını göstermektedir. Fakat katılımcıların sanal gerçeklik ortamındaki deneyimleri arttıkça ölçüm işlemlerindeki kabiliyetlerinin artacağını düşünmekteyiz.

Ayrıca, "9. Sistem, mimarlık eğitiminde yüz yüze eğitime göre daha öğreticidir" ifadesi diğer maddelerle karşılaştırılmıştır. Klasik eğitimle karşılaştırıldığında daha düşük bir ortalama puan alınırken, daha yüksek bir standart sapma göstermiştir. Bu durum, katılımcıların sanal eğitim sisteminin geleneksel yüz yüze eğitime göre daha öğretici olup olmadığı konusunda fikir ayrılığı yaşadıklarını 3B olarak göstermektedir. Fakat biz bu sistemi yüz yüze eğitime alternatif değil, yüz yüze eğitime erişim olmadığında ya da yüz yüze eğitimi destekleyici bir araç olarak tasarlanmış bulunmaktayız.

Geliştirilen sistem öğrenciler tarafından yüz yüze eğitime göre daha az yorucu bulunmuştur. Bu durum yüz yüze derslerde öğrencilerin ölçüm işlemlerinde fiziksel olarak çok daha fazla efor sarfettiklerini, buna karşın sanal ortamda ise daha az hareket ile daha fazla iş yapabildikleri göstermektedir. Sonuç olarak, bu bulgular, geliştirdiğimiz sistemin mimarlık eğitiminde sanal bir yardımcı araç olarak kullanılabilirliğini göstermektedir. Bunun yanı sıra bu yaklaşımın başka alanlardaki uygulamalı derslerde kullanılabilirliği öngörülmektedir.

Çalışmalarımız sırasında bazı önemli çıkarımlarda bulduk. Öncelikle, tarihi alanların genellikle doğal engelikleri göz önünde bulundurmak gerekiyor. Öğrencilere gerçekçi bir deneyim sunabilmek adına, bu tür engebeli ve düz olmayan zeminlerin ya da eğimli duvarların, hataların kabul edildiği bir öğrenme ortamı yaratabileceğini fark ettik. Ayrıca yansıtıcı yüzeyler bazen SG başlıklarının konum ve poz takibi sorunları ve takip kayıp hataları ile karşılaşabileceğini gördük. Dolayısıyla, kullanıcıların yansıtıcı olmayan yüzeylerle etkileşime girmesi, bu tür hataları önlemeye yardımcı olabilir. Son olarak, kullanıcıların fiziksel hareket alanı da önemlidir. Eğer birden fazla kullanıcı aynı fiziksel ortamı paylaşıyorsa, onların birbirleriyle çarpışmalarını önlemek için her birine geniş hareket alanları sağlanması gerektiğini anladık.

#### 4.3. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, restorasyon öncesi veri toplama işlemi tamamlanmış olan Tarihi Safranbolu Binası ilk haline benzer olarak yeniden dijital olarak inşa edilmiştir, etkileşimli sanal gerçeklik ortamına aktarılmış, mimarlık öğrencilerinin eğitim ve öğretim süreçlerine katkı sağlamak amacıyla bu dijital ortamda kullanılmak üzere çeşitli ölçüm araçları geliştirilmiştir. Öğrenciler, Safranbolu Tabakhane Binası'nı sanal ortamda incelemiş ve sanal ölçüm araçlarını kullanmışlardır. Bu çalışma, sanal gerçeklik teknolojisinin tarihi yapıların restorasyonunda bir eğitim aracı olarak kullanılabilir potansiyelini incelerken, mimarlık öğrencileri için interaktif

bir uygulamalı öğrenme deneyimi sunmuştur. Uygulanan anket çalışmasının sonuçlarına göre, öğrencilerin büyük çoğunluğunun ilk SG deneyimi olmasına rağmen, uygulama öğrenciler tarafından gerçekçi ve kullanımı kolay bulunmuştur. Pandemi, doğal afet ve olumsuz hava koşulları gibi erişim engellerini ortadan kaldırarak, öğrencilerin tarihi bir yapının restorasyon sürecini gerçek ölçülerde ve gerçek zamanlı olarak farklı fiziksel ortamda olmalarına rağmen aynı ortamdaymış gibi deneyimlemelerine olanak sağlamıştır.

Bu uygulamanın öğrenciler üzerindeki etkisi incelendiğinde, öğrenciler sanal gerçeklik ortamında elde ettikleri deneyimin gerçekçi ve kullanıcı dostu olduğunu belirtmişlerdir. Sanal ortamda yapılan etkileşimlerin ve ölçüm uygulamalarının, gerçek bir restorasyon sürecine hazırlanmaları konusunda önemli bir adım olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma sanal gerçeklik teknolojisinin restorasyon eğitimine katkıda bulunabileceğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, sanal gerçeklikteki ölçüm araçları, restorasyon sürecinde kullanılan gerçek ölçüm araçlarına benzer olduğundan öğrencilerin bu araçları kullanırken deneyim kazanmalarını sağlamıştır. Yani bu teknoloji, öğrencilere gerçekçi bir uygulamalı öğrenme deneyimi sağlamaktadır. Bu sayede, tarihi yapıların korunması ve restorasyonu konusunda eğitim alan öğrencilere daha fazla pratik yapma fırsatı da sağlanmıştır.

Her ne kadar öğrenciler geliştirilen uygulamayı çok beğenerek ve eğlenerek kullansalar da uygulamanın çizim doğruluğu açısından çıktılarının yüz yüze eğitimle kıyaslanamayacağı kullanıcı deneyimlerinde görülmüştür. Bu kapsamda gelecekte rölöve çizim doğruluğunu arttıracak, ölçüm araçlarını kullanım konusunda kullanıcıları uyuracak ve daha gelişmiş ölçüm aletlerini sanal versiyonlarını da içerecek şekilde uygulamamızı geliştirmeyi hedeflemekteyiz.

## Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Ulusal Ajansı tarafından Erasmus+ Yükseköğretim Programı 2020 Yılı Ana Eylem – KA226 Dijital Eğitime Hazırlık İçin Ortaklıklar çağrısı kapsamında yer alan “Digitizing Architectural Restoration Education through Virtual Reality” isim ve 2020-1-TR01-KA226-HE-098433 proje numarası ile desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Donath D, Thurow T. Integrated architectural surveying and planning: methods and tools for recording and adjusting building survey data. *Autom Constr.* 2007;16:19–27.
- [2] Maghool SAH, Moeini SH (Iradj), Arefazar Y. An educational application based on virtual reality technology for learning architectural details: challenges and benefits. *International Journal of Architectural Research: ArchNet-IJAR.* 2018;12:246-272.
- [3] Jumani AK, Siddique WA, Laghari AA, Abro A, Khan AA. Virtual reality and augmented reality for education. *Multimedia Computing Systems and Virtual Reality.* CRC Press, 2022;189–210.
- [4] Embaby, Mohga E. Heritage conservation and architectural education: An educational methodology for design studios. *HBRC Journal.* 2014;10(3):339-350.
- [5] ICOMOS, UK. Guidelines on education and training in the conservation of monuments, ensembles and sites. London; ICOMOS, 1993.
- [6] Arrighi G, See ZS, Jones D. Victoria theatre virtual reality: a digital heritage case study and user experience design. *Digital applications in archaeology and cultural heritage.* 2021;21:e00176.
- [7] Ferwati MS, El Menshawy S. Virtual reconstruction of the historic city of Al-Zubarah in Qatar. *Digital applications in archaeology and cultural heritage.* 2021;21:e00177.
- [8] Fukuda T, Ban H, Yagi K, Nishiie J. Development of high-definition virtual reality for historical architectural and urban digital reconstruction: a case study of Azuchi Castle and Old Castle Town in 1581. *Communications in Computer and Information Science.* Springer Verlag; 2015;75–89.
- [9] Oudatzi K. Virtual reality in restoration of historic buildings: 3d model projection of the restoration project of Alaca Imaret Cami with intuitive and interactive application through hyper realism technology. In: 2010 16th International Conference on Virtual Systems and Multimedia; 20–23 Oct. 2010; Seoul, Korea: IEEE. pp. 361–364.
- [10] Daşdemir Y. A brain-computer interface with gamification in the Metaverse. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi.* 2021;12(4):645–652.
- [11] Zhang Y, Liu H, Kang S-C, Al-Hussein M. Virtual reality applications for the built environment: Research trends and opportunities. *Autom Constr.* 2020;118:103311.
- [12] Radianti J, Majchrzak TA, Fromm J, Wohlgenannt I. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Comput Educ.* 2020;147:103778.
- [13] Özacar K, Ortakçı Y, Küçükçakara MY. VRArchEducation: Redesigning building survey process in architectural education using collaborative virtual reality. *Comput Graph.* 2023;113:1–9.

- [14] Walmsley AP, Kersten TP. The imperial cathedral in Königsplatz (Germany) as an immersive experience in virtual reality with integrated 360° panoramic photography. *Applied Sciences*. 2020;10(4):1517.
- [15] Hrozek F, Sobota B, Szabó C. Digital preservation of historical buildings using virtual reality technologies. *Open Computer Science*. 2012;2:272–282.
- [16] Kersten TP, Tschirschwitz F, Deggim S. Development of a virtual museum including a 4D presentation of building history in virtual reality. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2017;2/W3:361–367.
- [17] Erbaş E, Tuncel D. Kültür Varlıklarının Sanal Ortamda Yeniden İşlevlendirilmesi: Yerebatan Sarnıcı Örneği. *European Journal of Science and Technology*. 2022;41:362-372
- [18] De Paolis LT, Faggiano F, Gatto C, Barba MC, De Luca V. Immersive virtual reality for the fruition of ancient contexts: The case of the archaeological and Naturalistic Park of Santa Maria d’Agnano in Ostuni. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2022;27:e00243.
- [19] Şahbaz E. VR-based interactive learning in architectural education: a case on Safranbolu Historical Bathhouse. *Iconarp International Journal of Architecture and Planning*. 2020;8:342–356.
- [20] Bashabsheh AK, Alzoubi HH, Ali MZ. The application of virtual reality technology in architectural pedagogy for building constructions. *Alexandria Engineering Journal*. 2019;58:713–723.
- [21] Williams J, Orooji F, Aly SJ. Integration of virtual reality (vr) in architectural design education: exploring student experience. In: *ASEE Annual Conference and Exposition; 15-19 June 2019; Tampa, Florida, USA:ASEE*. 27354:1-11.
- [22] Erkan İ. Investigation of the contribution of virtual reality to architectural education. *Art, Design & Communication in Higher Education*. 2020;19:221–240.
- [23] A. Aboushal E, Salah Gharib M. The future of architectural education in Egypt: Architecture pedagogy focuses on educational concepts and approaches. *Engineering Research Journal*. 2021;171:301–313.
- [24] Ibrahim A, Al-Rababah AI, Bani Baker Q. Integrating virtual reality technology into architecture education: the case of architectural history courses. *Open House International*. 2021;46:498–509.
- [25] Jenek W, Caldwell G, Donovan J, Garcia Hansen V, Adcock M, Xi M, et al. Media architecture in architecture studio education capturing dynamics in the process: exploring how architecture students design with virtual design environments tools. In: *MAB20: Media Architecture Biennale 20; 28 June - 2 July 2021; Amsterdam and Utrecht, Netherlands*: pp. 200–204.
- [26] Anifowose H, Yan W, Dixit M. BIM LOD + Virtual Reality - Using game engine for visualization in architectural & construction education. *CoRR*. 2022;abs/2201.09954.
- [27] Safikhani S, Keller S, Schweiger G, Pirker J. Immersive virtual reality for extending the potential of building information modeling in architecture, engineering, and construction sector: systematic review. *Int J Digit Earth*. 2022;15:503–526.
- [28] Fidan F. Safranbolu’da tabakhane bölgesi örneğinde endüstriyel alanların incelenmesi, kamusal fonksiyonlarla yeniden değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi; İstanbul, Türkiye, 2011.
- [29] MRTK-Unity Developer Documentation - MRTK 2 | Microsoft Docs. <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/mrtk2/?view=mrtkunity-2022-05>. Erişim Tarihi 21 Haziran 2022.
- [30] Photon. <https://www.photonengine.com/>. Erişim Tarihi 20 Haziran 2022.
- [31] Oculus VR, 2021. <https://developer.oculus.com/blog/meta-avatars-sdk-now-available/>. Erişim Tarihi 20 Haziran 2022.
- [32] Karaoglan-Yılmaz FG, Yılmaz R, Zhang K, Ustun AB. Development of educational virtual reality attitude scale: A validity and reliability study. *Virtual Reality*. 2023;27:1875-1885



## Investigation and Optimization of Biosorbent Capacities of Some Plants Used in Daily Life

Sibel ARSLAN<sup>1\*</sup>, Nurşah KÜTÜK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Software Engineering, Faculty of Technology, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Turkey

<sup>2</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Sivas Cumhuriyet University, Sivas, Turkey

\*<sup>1</sup> sibelarslan@cumhuriyet.edu.tr, <sup>2</sup> nkutuk@cumhuriyet.edu.tr

(Geliş/Received: 13/09/2023;

Kabul/Accepted: 01/11/2023)

**Abstract:** In this study, sage, chamomile, and tarragon leaves, which are used as spices and consumed as beverages in daily life, were considered as different biosorbents that can be used in water purification by biosorption. At the same time, the effects of the parameters of initial dye concentration (10-200 mg/L), temperature (20-50 °C) and contact time (0-120 min) on biosorption capacity were investigated. The biosorption processes were found to follow Freundlich isotherm and pseudo-second order (PSO) reaction kinetics. In the study, the process was also modeled using multi-tree evolutionary computation based automatic programming (AP) methods. The methods used initial dye concentration, temperature, and contact time as variables. According to the simulation results, these methods obtained nonlinear mathematical models of the processes with  $R^2$  values as high as 0.99 for each biosorbent. By providing the most accurate models to accurately predict biosorption capacity, this study will make a significant contribution to the field of water treatment using experimental and AP methods.

**Keywords:** Biosorbent, plant, dye, automatic programming methods, genetic programming.

### Günlük Hayatta Kullanılan Bazı Bitkilerin Biyosorbent Kapasitelerinin İncelenmesi ve Optimizasyonu

**Öz:** Bu çalışmada, biyosorpsiyon ile suyun arıtılmasında kullanılmak üzere günlük hayatta baharat olarak kullanılan ve içecek olarak tüketilen adaçayı, papatya ve tarhun yaprakları farklı biyosorbentler olarak ele alınmıştır. Aynı zamanda, başlangıç boya konsantrasyonu (10-200 mg/L), sıcaklık (20-50 °C) ve temas süresi (0-120 dk) parametrelerinin biyosorpsiyon kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Biyosorpsiyon süreçlerinde Freundlich izotermi ve yalancı ikinci merteye (Pseudo Second Order, PSO) reaksiyon kinetiğinin takip edildiği belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca süreç, çok ağaçlı evrimsel hesaplama tabanlı otomatik programlama (Automatic Programming, AP) yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Yöntemler, başlangıç boya konsantrasyonu, sıcaklık ve temas süresini değişken olarak kullandılar. Simülasyon sonuçlarına göre bu yöntemler süreçlerin doğrusal olmayan matematiksel modellerini her bir biyosorbent için 0.99'a varan  $R^2$  değerleri ile elde etmişlerdir. Biyosorpsiyon kapasitesini doğru bir şekilde tahmin etmek için en doğru modelleri sağlayan bu çalışma, deneysel ve AP yöntemleri ile su arıtımı alanına önemli bir katkı sağlayacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Biyosorbent, bitki, boya, otomatik programlama yöntemleri, genetik programlama.

#### 1. Introduction

Water is the essential ingredient for the continuation of life. Unfortunately, with the development of industry and modern life, water pollution is increasing [1]. Synthetic dyes used in many industries are released into nature due to their presence in water flow systems. Due to their resistance to biological water treatment processes, they remain as colored and toxic waste in the environment [2]. Dyes that are stable against oxidizing agents increase the oxygen requirement of aquatic plants by affecting photosynthesis [3]. They can also cause skin irritation on humans can also be carcinogenic [4].

Various techniques are available to remove pollutions from water, such as ultrafiltration, electrodialysis or reverse osmosis [4]. Adsorption technique is a simple, cost-effective and effective method for removing dyes from wastewater [5]. The biosorption method using materials of biological origin is a physicochemical process. Various agricultural wastes used as biosorbent have various functional groups such as carbonyl and carboxyl that can form bonds with cationic and anionic dyes [6]. Methyl orange is a toxic and mutagenic dye known as anionic and azo dye. MO, which has high water solubility and low biodispersibility, is used in many sectors and laboratories. It is harmful to human health and the environment [7].

\* Sorumlu yazar: [sibelarslan@cumhuriyet.edu.tr](mailto:sibelarslan@cumhuriyet.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-3626-553X, <sup>2</sup> 0000-0001-5799-3865.

In this study, some plants that can be drunk as tea in daily life or used in meals are considered as biosorbent. For this purpose, the biosorption reaction of sage, tarragon and chamomile leaves against methyl orange (MO) dye was investigated by isotherm and kinetics studies. Initial dye concentration, contact time and temperature parameters were optimized for the process using automatic programming (AP) methods. Multi Gene Genetic Programming (MGGP) and Multi Hive Artificial Bee Colony Programming (MHABCP) were used for the study. MGGP was developed based on the Genetic Algorithm (GA). MABCP is inspired by the Artificial Bee Colony (ABC). Unlike the metaheuristics GA and ABC, the methods represent solutions with parse trees. For this reason, the equations used in metaheuristics to improve solutions are not used in the methods. AP methods use operators such as pruning and grafting that can improve trees. While MGGP tries to improve them with genetic operators such as crossover and mutation, MHABCP tries to improve them with another operator called information sharing mechanism. Both methods are more powerful than solutions that aim to grow horizontally by making the tree depth shallower and their standard versions. The main reason why these methods are preferred in the study is that they can create nonlinear models of systems through automatic regression. Moreover, these methods are used in various fields to successfully solve engineering problems, such as predicting the performance of tunnel boring machines [8], inferring error severity from symbolic regressed inferential sensors [9], the artificial ant problem [10], automatic feature selection [11].

The contributions and motivations of the study can be listed as follows:

- To the best of our knowledge, these experiments were the first to use multi-tree structured methods, whose success has been proven in many problems, and whose successes were compared.
- The models generated by the methods were ranked according to their error values, and the models with the lowest error were determined for the experiments.
- The ability of the best models to represent the system is presented to the readers with various visual graphics.

The remainder of this paper as follows. Section 2 provides explanations of material and method. Section 3 presents data analysis, parameters, and evaluation criteria. Section 4 describes results and discussion. Finally, the paper concludes in Section 5 with summarizing the observations and remarking the future work.

## 2. Material and Method

In the study, MO was obtained from Surechem Product company. All the plants were obtained from local markets.

For MO biosorption, a solution volume of 100 mL was used in glass flasks with a volume of 250 mL. 0.2 grams of dried leaves of sage, tarragon and chamomile tea were added to the dye solution and the process was continued for 120 min. Samples were taken at certain intervals, filtered and the absorbance of the samples was measured at 464 nm in UV vis spectroscopy. Dataset for optimization was obtained using absorbance data of samples taken at certain intervals. The dye concentration was examined in the range of 10-200 mg/L, temperature 20-50 °C and contact time 0-120 min.

Biosorption efficiency and biosorption capacity values ( $q$ ) were calculated according to Equations 1 and 2.  $q_e$  is the biosorption capacity at equilibrium and  $q_t$  is the biosorption capacity at time  $t$ .

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e).V}{m} \quad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t).V}{m} \quad (2)$$

### 2.1. Multi-Tree based automatic programming methods

The multi-tree AP methods extend the models horizontally by expressing them as combinations of multiple trees, unlike the standard versions. The depth of each tree is chosen to be rather shallow so that the crossover and mutation operators can work more effectively [12]. In addition, these shallow trees also allow for displacement with the high-level crossover/hive exchange mechanism.

A representative model example of the methods is given in Figure 1, and an example of a high-level crossover/hive exchange mechanism is shown in Figure 2. As can be seen in Figure 1, the methods generate trees of mathematical functions and terminals (such as  $x$ ,  $y$ ). Each tree is multiplied by various automatically generated coefficients and summed. Model generation is completed by adding bias to the collection, similar to neural networks. Model trees can be exchanged, as shown in the example of the high-level crossover/hive exchange

mechanism. The displacement points are determined randomly. Here, the suitability of the new model resulting from the displacement of the trees is evaluated by the parameter  $Gmax/Hmax$ . This parameter defines the maximum number of trees that the model can have.

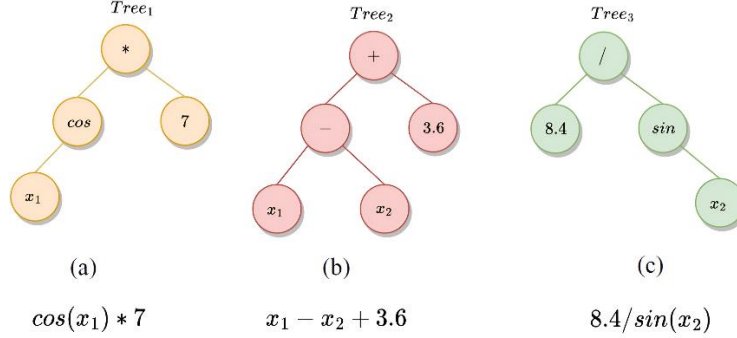


Figure 1. Multi-tree AP methods

Two different well-known AP methods were used in this study. One method is Multi Gene GP (MGGP) and the other is MHABCP. Both methods were developed according to metaheuristics. MGGP, Genetic Algorithm; MHABCP adopts the principles of ABC. After generating models with multitree structures, the methods try to evolve them with their own improvement operators until the stopping criterion(s) are satisfied. MGGP improves the models using crossover, mutation, and high-level crossover. The improvement operators of MHABCP are the information sharing mechanism and the hive exchange mechanism. Details of the algorithms can be found in [13].

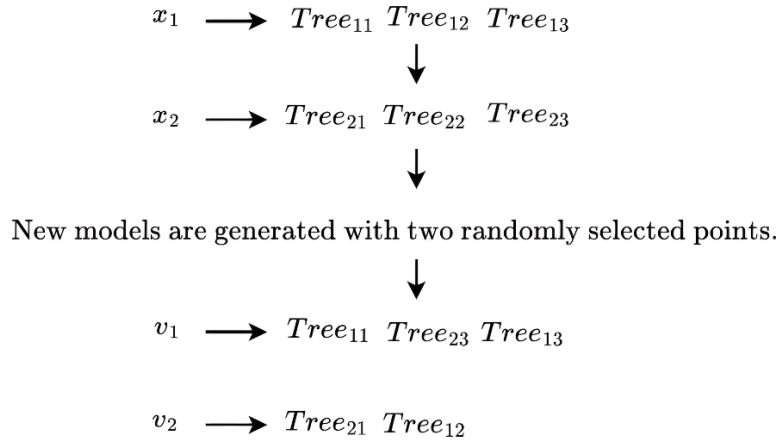


Figure 2. High level crossover/Hive exchange mechanism

### 3. Experimental Design

In this section, we presented the data set and details of the evaluation criteria and parameters.

#### 3.1. Data and analysis

Sage, chamomile, and tarragon leaves were considered as different biosorbents, and three separate datasets were used for each in the conducted experiments. These datasets were generated under laboratory conditions. The total number of samples in each dataset is 34, with 27 randomly assigned to the training set (approximately 70%) and the remaining 7 to the test set (approximately 30%) [14]. They used in the experiments consist of 4 features, including 3 features and 1 target variable (biosorption capacity). These features are, respectively, ( $x_1$ ) initial dye concentration (10-200 mg/L), ( $x_2$ ) temperature (20-50 °C), and ( $x_3$ ) contact time (0-120 min). Models were created using these features through the AP methods. Predictions were made on the target variable with a biosorption mechanism.

### 3.2. Parameters

The parameters of AP methods were selected to be the same for a fair comparison. While high-level crossover, crossover, mutation, and direct reproduction operators are used in MGGP to improve solutions, information sharing mechanism and hive exchange mechanism operators are used in MHABCP. These parameters are presented in Table 1.

**Table 1.** Parameters of AP methods

Parameters	MGGP	MHABCP
Population size	300	-
Colony size	-	300
Generation	500	500
Maximum tree depth	5	5
Crossover rate	0.84	-
Mutation rate	0.14	-
Direct reproduction rate	0.02	-
Tournament size	15	-
Limit	-	50
Maximum number of gen/hive	2	2
Information sharing mechanism rate	-	0.8
Hive exchange mechanism rate	-	0.2
High level crossover	0.2	-
Functions	+, -, *, /, square, cube	

### 3.3. Evaluation criteria

Root mean squared error (*RMSE*) and coefficient of determination ( $R^2$ ) were used to evaluate the performance of AP methods. These criteria are presented in Equations 3 and 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

where  $\hat{y}_i$  is the predicted values of  $y$ ,  $\bar{y}$  is the mean value of  $y$ , and  $y_i$  is the observed values of  $y$ .

## 4. Result and Discussion

### 4.1. Initial dye concentration

The particle size for sage, tarragon and chamomile is in the range of 0.5-2 mm each. Biosorbent particle size can affect biosorption. Different results have been obtained on this subject in the literature. In a study in which egg shell was used as a biosorbent, it was reported that biosorption efficiency and biosorption capacity increased as the particle size increased [15]. In another study, it was suggested that a small adsorbent size increased the surface/volume ratio and contact surface [16]. In this study, the size of the biosorbents are close to each other and the effect of particle size on biosorption was not examined.

The biosorption capacity of MO according to the initial dye concentration (range of 10-200 mg/L) was investigated for all 3 biosorbents. As the initial dye concentration increased (Figure 3), the biosorption capacity continued to increase with different increasing characteristics. The reason for this situation can be explained by the active sites on the surface of biosorbents [4]. In all biosorbents,  $q_e$  increased as the initial dye concentration increased, consistent with the literature [17]. It was observed that the  $q_e$  values of sage tea and tarragon plant were very close to each other, and it was calculated that tarragon reached the highest  $q_e$  as 49 mg/g. Chamomile has reached  $q_e$  value of 30 mg/g.



Isotherms were used to investigate the usability of the biosorbent used and to understand the mechanism of the biosorption reaction. The formulation of the Freundlich isotherm is given in Equations 5.  $Lnq_e$  versus  $LnC_e$  plots plotted according to Equation 5 are in Figure 4 and the data obtained are in Table 2.

$$Lnq_e = LnKf + \left(\frac{1}{n}\right) LnC_e \quad (5)$$

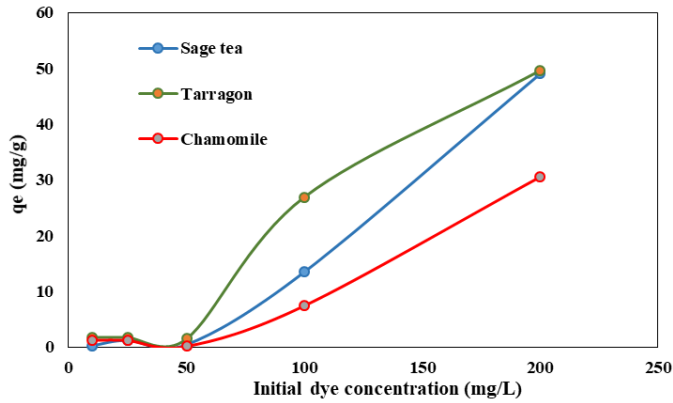


Figure 3. Effect of initial dye concentration on biosorption capacity

It is suitable for the Freundlich isotherm for MO biosorption of dry plant leaves. The Freundlich isotherm indicates heterogeneous biosorbent surface and multilayer adsorption. The value of  $n$  gives information about the process of the Freundlich isotherm.  $n$  value less than 1 indicates the presence of physical biosorption [1].

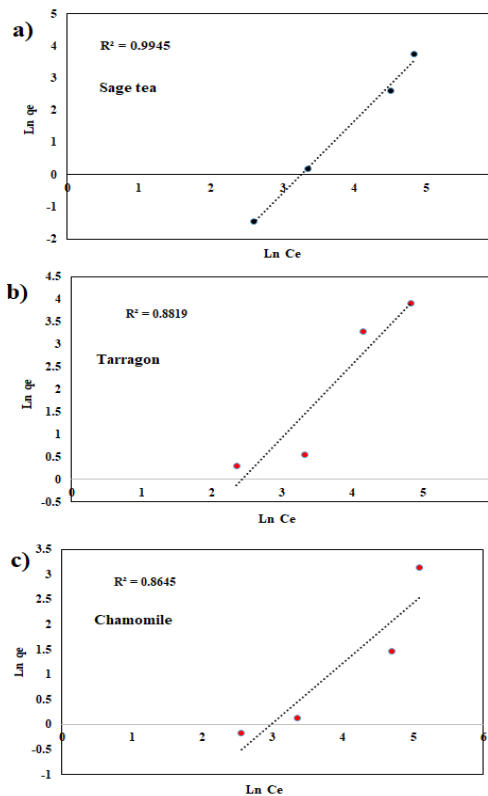


Figure 4. Freundlich isotherms of a) sage tea, b) tarragon and c) chamomile

**Table 2.** Isotherm data

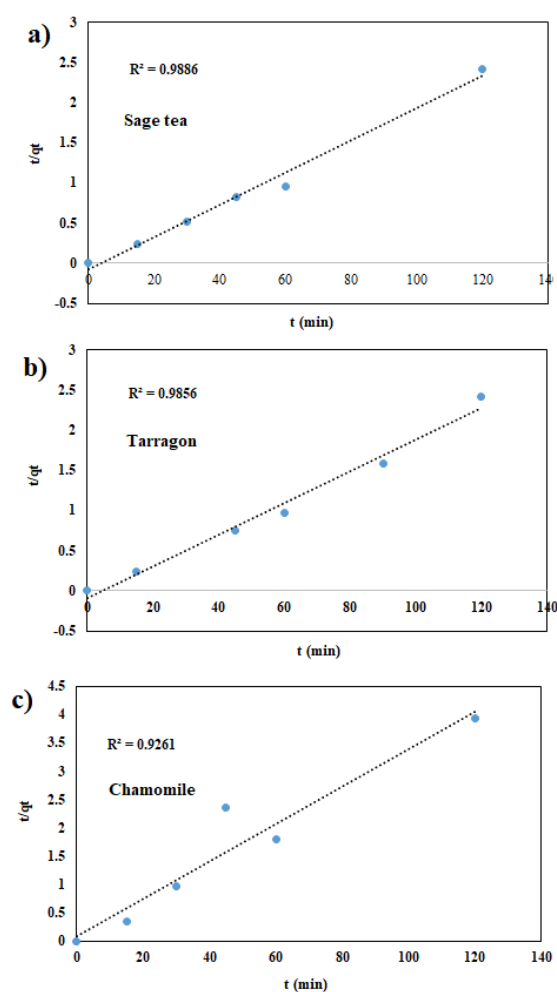
Isotherms Freundlich	Sage tea	Tarragon	Chamomile
$R^2$	0.99	0.88	0.86
$n$	0.44	0.61	0.83
$Kf$	$6.28 \times 10^{-4}$	0.019	0.029

#### 4.2. Effect of contact time

MO biosorption mechanism kinetics for sage, tarragon and chamomile leaves were investigated with PSO reaction kinetics. The kinetics were analyzed according to the formula given in Equation 6.  $t/q_t$  versus  $t$  plots drawn according to Equation 6 are given in Figure 5.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (6)$$

It can be said that the biosorption reaction is compatible with PSO reaction kinetics. In this case, MO biosorption of all biosorbents may also indicate the presence of chemisorption [6]. With this result, it can be said that there is first a rapid biosorption in the reaction for sage, tarragon and chamomile and then a slower secondary step until equilibrium is reached [18].



**Figure 5.** PSO kinetic graphs a) sage tea, b) tarragon, c) chamomile

### 4.3. Thermodynamic parameters

Temperature gives information about the feasibility of biosorption [18]. In this study the effect of temperature on the biosorption mechanism was investigated with thermodynamic parameters. Using Equations 6, 7 and 8,  $\Delta H$  (enthalpy),  $\Delta S$  (entropy) and  $\Delta G$  (free energy) are obtained.  $K_c$  is the equilibrium constant due to biosorption and  $R$  is the ideal gas (8.314 J/mol.K) constant.

$$K_c = C_a/C_e \quad (6)$$

$$\ln K_c = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (8)$$

As seen in Table 3, negative  $\Delta H$  values indicate an exothermic reaction, and negative  $\Delta S$  values indicate reduced randomness [18]. Whether the adsorption reaction is exothermic involves physisorption or chemisorption or a mixture of both [19]. For biosorbents, the positive  $\Delta G$  value increased as the temperature increased. This result indicates that biosorption may be preferred at lower temperature [20]. In addition, a positive  $\Delta G$  value indicates that biosorption is not spontaneous [21].

**Table 3.** Thermodynamic data

Biosorbent	$\Delta H$ (J/mol)	$\Delta S$ (J/K.mol)	$\Delta G$ (293 K, kJ/mol)	$\Delta G$ (308 K, kJ/mol)	$\Delta G$ (323 K, kJ/mol)
Sage tea	-4.31	-9.25	2.7	2.84	2.98
Tarragon	-7.217	-17.4	5.09	5.31	5.6
Chamomile	-6.6	-19.22	5.6	5.91	6.2

Similar parameters have been discussed in the literature for MO removal with natural biosorbents or adsorbents. In the study of Zaghoul et al., MgAl layered double hydroxide was synthesized as an adsorbent in MO removal. It was determined that the adsorption reaction followed the PSO kinetic model and reached 197.62 mg/g  $q_e$  at an initial concentration of 100 mg/L [22]. In another study using graphene oxide, MO removal was examined for 100 minutes. The effect of the initial dye concentration was examined in the range of 0.2-0.8 mg/L and the highest  $q_e$  value was reached at 0.2 mg/L dye concentration. It has been reported that the reason for this situation is that GO has a negatively charged surface [23]. In a study in which *Momordica charantia L.* leaves were used as biosorbent, it was determined that MO biosorption followed the Freundlich isotherm and PSO [17]. Compared to the literature, it is thought that efficient results are obtained from the biosorbents we use in MO removal.

### 4.4. Simulation results and discussion

In this section, biosorption capacity prediction was performed for 3 different datasets (Chamomile, Sage tea, Tarragon) using AP methods. The simulation results of each dataset are presented in Tables 4, 5 and 6 respectively. The best values in the tables are bolded.

In the models generated by the AP methods for the chamomile dataset, MHABCP has shown better results in terms of mean  $RMSE_{train}$  values. However, in their best performances, MGGP has produced a better model with a difference of approximately 0.7476. In contrast to  $RMSE_{train}$ , MGGP is more successful on mean in  $RMSE_{test}$ , and it is approximately 2.1 times better. The  $R^2$  performance evaluation criterion approaching 1 indicates that the model's predictions are increasingly accurate and successful [24]. Therefore, in mean, MHABCP is better in  $R^2_{train}$ , and MGGP is better in  $R^2_{test}$ , with the largest difference being 0.1467 in  $R^2_{test}$ . At the same time, in the best values of these criteria, MGGP is superior. A small standard deviation indicates that there is little difference between the models generated by the method [25]. Overall, MGGP has produced models with lower standard deviations, resulting in models that are closer in performance [26].

**Table 4.** Chamomile results

Criteria	Chamomile		
	MHABCP	MHGP	
$RMSE_{train}$	Mean	<b>3.0971</b>	3.7995
	Best	1.8332	<b>1.0856</b>
	Std	1.3690	1.4601
$RMSE_{test}$	Mean	6.5142	<b>3.0994</b>
	Best	2.5828	<b>0.6318</b>
	Std	1.8323	1.7224
$R^2_{train}$	Mean	<b>0.9121</b>	0.8728
	Best	0.9741	<b>0.9909</b>
	Std	0.0883	0.0781
$R^2_{test}$	Mean	0.7982	<b>0.9449</b>
	Best	0.9705	<b>0.9982</b>
	Std	0.0994	0.0508

**Table 5.** Sage tea results

Criteria	Sage tea		
	MHABCP	MHGP	
$RMSE_{train}$	Mean	<b>2.3619</b>	2.6632
	Best	1.2262	<b>0.2922</b>
	Std	0.6329	1.1782
$RMSE_{test}$	Mean	6.8539	<b>4.2737</b>
	Best	2.6748	<b>0.8327</b>
	Std	1.1058	1.5764
$R^2_{train}$	Mean	<b>0.9875</b>	0.9823
	Best	0.9969	<b>0.9998</b>
	Std	0.0068	0.0148
$R^2_{test}$	Mean	0.8937	<b>0.9544</b>
	Best	0.9842	<b>0.9985</b>
	Std	0.0278	0.0293

In the models generated for sage tea, MHABCP performs better in terms of  $RMSE_{train}$  on mean, while MGGP outperforms in  $RMSE_{test}$ . Similar to Daisy, MGGP has produced better results than MHABCP according to these evaluation criteria. Both methods have very close  $R^2_{train}$  values, with differences of only 0.0052 and 0.0029 in means and best values, respectively. In  $R^2_{test}$ , however, MGGP has a more successful model with a score of 0.9985.

**Table 6.** Tarragon results

Criteria	Tarragon		
	MHABCP	MHGP	
$RMSE_{train}$	<b>Mean</b>	3.2723	<b>2.4563</b>
	<b>Best</b>	1.7549	<b>1.2868</b>
	<b>Std</b>	0.4429	0.7456
$RMSE_{test}$	<b>Mean</b>	1.8342	<b>1.5646</b>
	<b>Best</b>	1.1370	<b>0.6129</b>
	<b>Std</b>	0.4267	0.4115
$R^2_{train}$	<b>Mean</b>	0.9788	<b>0.9872</b>
	<b>Best</b>	0.9940	<b>0.9968</b>
	<b>Std</b>	0.0052	0.0071
$R^2_{test}$	<b>Mean</b>	0.9905	<b>0.9930</b>
	<b>Best</b>	0.9965	<b>0.9990</b>
	<b>Std</b>	0.0043	0.0036

In the tarragon dataset, MGGP performs well in terms of mean evaluation criteria and achieves the best values. However, MHABCP produces values that are very close to those of MGGP. For example, in terms of mean  $R^2_{train}$  and  $R^2_{test}$ , they differ by only 8.4% and 2.5%, respectively, which is a very small margin. The standard deviation values are also similar between the methods. This indicates that the methods generate close values for this dataset.

#### 4.5. Analysis of the best models of AP methods

In this subsection, the best models generated by the AP methods are presented. Table 7 and 8 provide simplified mathematical equations for the models. The models in Tables 7 and 8 were generated by combining different functions provided in Table 1.

**Table 7.** The best models obtained by MGGP

Dataset	Simplified Model
Chamomile	$\frac{6.1 \times 10^{15} x_2^2}{2.3 \times 10^{18} x_2 - 4.6 \times 10^{18} x_3} + 6.6 \times 10^{-4} x_1^2 + 2.5 \times 10^{-8} x_3 (2.9x_2 - 1.0x_1x_2)(3.1x_2 - 1.0x_1x_3)$ $+ \frac{5.4 \times 10^{15} (x_2 - 1.0x_3)^2 (x_1^3 + x_2x_1 - 1.0x_3)}{3.8 \times 10^{22} x_3 - 3.8 \times 10^{22} x_2} + \frac{3.8 \times 10^{22} x_1}{x_2} + \frac{6.1 \times 10^{15} x_2 x_3}{9.2 \times 10^{18} x_1 - 9.2 \times 10^{18} x_3}$ $+ 3.5 \times 10^{-6} \frac{(x_1 + 2.7)^3 (x_2 - 1.0x_3 + x_1(x_2 - 0.48))}{x_3^3}$ $- \frac{4.7 \times 10^{-4} x_1^2 x_3^2}{(x_2 - 0.85)^2 (x_2 - 1.0x_3)^2} + \frac{4.1 \times 10^{15} x_2^2 (x_1 + x_1x_3)(3.1x_2 - 1.0x_1x_3)}{1.2 \times 10^{24} x_2 - 2.4 \times 10^{24} x_3} + 3.9 \times 10^{-8}$
Sage tea	$- \frac{8.0 \times 10^{15} x_1^4}{x_3} + \frac{8.0 \times 10^{15} x_1^3 x_2^2}{1.5 \times 10^{23} x_3} + \frac{1.5 \times 10^{23} x_1 x_2}{x_3} - \frac{1.0(7.5 \times 10^{15} x_2 x_3 x_1^3 - 2.0 \times 10^{19})}{1.9 \times 10^{22} x_2 x_3} - \frac{1.9 \times 10^{22} (x_1 - 1.5)}{x_3}$ $- \frac{1.0(-7.6 \times 10^{15} x_2 x_1^4 + 7.6 \times 10^{15} x_3 x_1^2)}{2.6 \times 10^{21} x_3 + 9.4 \times 10^{21} x_2 x_3} - 5.8 \times 10^{-8} x_3^2 (x_2 - 7.2)^2 - 1.1 \times 10^{-7} x_1^2 x_2 x_3$ $+ 1.1 \times 10^{-7} x_1^2 x_2 (x_2 - 1.0x_3) + \frac{7.3 \times 10^{-12} x_1^2 ((x_1 - 1.0x_2)^2 - 1.0x_1^3)(x_2 - 1.0x_3)^2}{x_3^2} - 6.0 \times 10^{-4}$

$$\begin{aligned}
& 1.5 \times 10^{-4} \left( x_2 + \frac{x_2}{x_1} - 10.0 \right)^2 - 1.5 \times 10^{-3} x_1 + 1.5 \times 10^{-4} x_1 x_2 \\
& - \frac{0.53 \left( x_3 + \frac{x_2}{x_3} - 8.7 \right)^2}{(2.0x_3 - 1.0x_1 + 5.2)^2} - 6.0 \times 10^{-4} x_2^2 + \frac{6.3 \times 10^{14} x_1 (2.0x_1 - 1.0x_3)}{3.6 \times 10^{16} x_3 + \frac{3.6 \times 10^{16} x_3}{x_2(x_2 - 1.0x_3)}} \\
\text{Tarragon} & + \frac{5.6 \times 10^{15} x_2 (x_1 - 1.0x_3 + 3.0)}{\frac{2.9 \times 10^{17} (x_1 + x_3)}{x_3 - 2.1} - 2.9 \times 10^{17} x_3 + \frac{2.9 \times 10^{17} x_2}{x_1} + 6.2 \times 10^{17}} \\
& + \frac{2.3 \times 10^{15} x_1 (x_2 - 5.5)}{3.6 \times 10^{16} x_3 + \frac{1.5 \times 10^{16} x_1}{x_2}} - \frac{2.6 \times 10^{-6} x_1^2 (x_3^2 - 1.0x_3 + x_2)}{x_3^2 \left( \frac{x_3}{x_1} - \frac{1.0x_3}{x_2} \right)} + 0.38
\end{aligned}$$

Additionally, despite the low number of samples in the datasets, the equations are quite complex. Information regarding these equations is presented in Table 9.

**Table 8.** The best models obtained by MHABCP

Dataset	Simplified Model
Chamomile	$\frac{5.7 \times 10^{-3} (x_1 - 5.0)^3 (0.12x_2 + 1.0)}{(x_2 + 1.0) \left( x_1 - \frac{1.0x_3}{x_2} \right)} - \frac{4.7 \times 10^{15} x_3^4 (x_2 + x_3)^2}{3.9 \times 10^{24} x_3 - 1.6 \times 10^{26}} + 1.4 \times 10^{-6}$
Sage tea	$3.8 \times 10^{-8} x_1^3 x_2 - \frac{1.0(2.9 \times 10^{15} x_1^2 + 2.9 \times 10^{15} x_3 x_1)}{7.6 \times 10^{22} x_3^3 + 1.5 \times 10^{23} x_2}$ $- 3.8 \times 10^{-8} x_2^3 + 3.8 \times 10^{-8} x_3^3 + \frac{0.25(x_1^2 + x_3 x_1)^3}{x_3^3 + 2.0x_2^3} + 9.7 \times 10^{-4}$
Tarragon	$\frac{4.9 \times 10^{14} x_2 (x_1 - 6.2)(0.16x_1 - 0.32x_3)}{3.6 \times 10^{16} x_2 + 4.9 \times 10^{16}} - \frac{3.6x_1(x_2 + 1.3)}{x_3(x_3 - 8.4)(x_3 - 13.0) \left( \frac{x_1}{x_3} - 6.5 \right)} + 0.7$

As can be seen from Table 9, the tree structures of the models produced by MGGP have more complexity and number of nodes. Tree depths were taken the same when generating the models.

**Table 9.** Tree structures of the best models

Dataset	Tree Structure	MGGP	MHABCP
Chamomile	Node	81	37
	Depth	5	5
	Complexity	446	140
Sage tea	Node	114	40
	Depth	5	5
	Complexity	431	159
Tarragon	Node	111	40
	Depth	5	5
	Complexity	429	152

## 5. Conclusion

In this study, dry leaves of sage tea, tarragon, and chamomile were used to remove MO from an aqueous solution. It was observed that the biosorption capacity increased as the initial dye concentration increased. For the same process parameters, the highest biosorption capacity (49 mg/g) was obtained with tarragon leaves. After the experiments, the biosorption capacity for the biosorbents was modeled using the most commonly used evolutionary computation AP methods. The simulation results show that the error values of the models produced with AP methods are quite low. At the same time, the  $R^2$  values of these models are high, although the number of samples is small. Both methods used in the study gave very similar results; MGGP gave slightly better results than MHABCP. Therefore, this study shows that biosorption processes can be modeled using AP methods. In future studies, it is planned to use different AP methods to model different separation processes.

## References

- [1] Zafar, L., Khan, A., Kamran, U., Park, S. J., Bhatti, H. N. (2022). Eucalyptus (camaldulensis) bark-based composites for efficient Basic Blue 41 dye biosorption from aqueous stream: Kinetics, isothermal, and thermodynamic studies. *Surfaces and Interfaces*, 31, 101897.
- [2] Nielsen, B. V., Maneein, S., Anghan, J. D., Anghan, R. M., Al Farid, M. M., Milledge, J. J. (2022). Biosorption potential of *Sargassum* for removal of aqueous dye solutions. *Applied sciences*, 12(9), 4173.
- [3] Azari, A., Noorisepehr, M., Dehghanifard, E., Karimyan, K., Hashemi, S. Y., Kalhori, E. M., Norouzi, R., Agarwal, S., Gupta, V. K. (2019). Experimental design, modeling and mechanism of cationic dyes biosorption on to magnetic chitosan-lutaraldehyde composite. *International journal of biological macromolecules*, 131, 633-645.
- [4] Bouzikri, S., Ouasfi, N., Benzidia, N., Salhi, A., Bakkas, S., Khamliche, L. (2020). Marine alga “*Bifurcaria bifurcata*”: biosorption of Reactive Blue 19 and methylene blue from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 33636-33648.
- [5] Shukor, H., Yaser, A. Z., Shoparwe, N. F., Mohd Zaini Makhtar, M., Mokhtar, N. (2022). Biosorption study of methylene blue (MB) and brilliant red remazol (BRR) by Coconut Dregs. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022, 1-11.
- [6] Hevira, L., Zilfa, Rahmayeni, Ighalo, J. O., Zein, R. (2020). Biosorption of indigo carmine from aqueous solution by *Terminalia catappa* shell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104290.
- [7] El Amri, R., Elkacmi, R., & Boudouch, O. (2023). Removal of Methyl Orange from Water Using Microalgae: Effect of Operating Parameters, Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies. *Chemistry Africa*, 1-12.
- [8] Kazemi, M., & Barati, R. (2022). Application of dimensional analysis and multi-gene genetic programming to predict the performance of tunnel boring machines. *Applied Soft Computing*, 124, 108997.
- [9] Hale, W. T., Safikou, E., & Bollas, G. M. (2022). Inference of faults through symbolic regression of system data. *Computers & Chemical Engineering*, 157, 107619.
- [10] Boudardara, F., & GÖRKEMLİ, B., (2020). Solving artificial ant problem using two artificial bee colony programming versions. *Applied Intelligence*, vol.50, no.11, 3695-3717.
- [11] Sattar, M., Majid, A., Kausar, N., Bilal, M., & Kashif, M. (2022). Lung cancer prediction using multi-gene genetic programming by selecting automatic features from amino acid sequences. *Computational Biology and Chemistry*, 98, 107638.
- [12] Arslan, S., & Koca, K., (2023). Investigating the best automatic programming method in predicting the aerodynamic characteristics of wind turbine blade. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol.123, 106210-106225.
- [13] Arslan, S., & Ozturk, C., (2019). Multi Hive Artificial Bee Colony Programming for high dimensional symbolic regression with feature selection. *Applied Soft Computing*, vol.78, 515-527.
- [14] Nguyen, Q. H., Ly, H. B., Ho, L. S., Al-Ansari, N., Le, H. V., Tran, V. Q., ... & Pham, B. T. (2021). Influence of data splitting on performance of machine learning models in prediction of shear strength of soil. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-15.
- [15] Rápó, E., Aradi, L. E., Szabó, Á., Posta, K., Szép, R., & Tonk, S. (2020). Adsorption of remazol brilliant violet-5R textile dye from aqueous solutions by using eggshell waste biosorbent. *Scientific reports*, 10(1), 8385.
- [16] Holliday, M. C., Parsons, D. R., & Zein, S. H. (2022). Agricultural pea waste as a low-cost pollutant biosorbent for methylene blue removal: adsorption kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-15.
- [17] Shahab, M. R., Yaseen, H. M., Manzoor, Q., Saleem, A., Sajid, A., Malik, Q. M., & Ahmed, S. (2023). Adsorption of methyl orange and chromium (VI) using *Momordica charantia* L. leaves: a dual functional material for environmental remediation. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 20(3), 577-590.
- [18] Rambabu, K., Bharath, G., Banat, F., Show, P. L. (2020). Biosorption performance of date palm empty fruit bunch wastes for toxic hexavalent chromium removal. *Environmental research*, 187, 109694.
- [19] Tran, H. N., You, S. J., & Chao, H. P. (2016). Thermodynamic parameters of cadmium adsorption onto orange peel calculated from various methods: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 2671-2682.
- [20] Sah, M. K., Edbey, K., EL-Hashani, A., Almshety, S., Mauro, L., Alomar, T. S., AlMasoud N., Bhattarai, A. (2022). Exploring the biosorption of methylene blue dye onto agricultural products: A critical review. *Separations*, 9(9), 256.
- [21] Dall’Agnol, P., Libardi, N., da Silva, E. C., da Costa, R. H. R. (2022). Biosorption of Phosphorus Using Alginate-Like Exopolymers: investigation of removal mechanism, kinetic and thermodynamic properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-12.
- [22] Zaghoul, A., Benhiti, R., Ichou, A. A., Carja, G., Soudani, A., Zerbet, M., ... & Chiban, M. (2021). Characterization and application of MgAl layered double hydroxide for methyl orange removal from aqueous solution. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3793-3797.

- [23] Robati, D., Mirza, B., Rajabi, M., Moradi, O., Tyagi, I., Agarwal, S., & Gupta, V. K. (2016). Removal of hazardous dyes- BR 12 and methyl orange using graphene oxide as an adsorbent from aqueous phase. *Chemical Engineering Journal*, 284, 687-697.
- [24] Piepho, H. P. (2019). A coefficient of determination ( $R^2$ ) for generalized linear mixed models. *Biometrical Journal*, 61(4), 860-872.
- [25] Lee, D. K., In, J., & Lee, S. (2015). Standard deviation and standard error of the mean. *Korean journal of anesthesiology*, 68(3), 220-223.
- [26] Arslan, S., & Kütük, N., (2023). Symbolic regression with feature selection of dye biosorption from an aqueous solution using pumpkin seed husk using evolutionary computation-based automatic programming methods. *Expert Systems with Applications*, vol.231, 120676.



## Geleneksel Tahıl Kurutuculardaki Kanal Geometrisinin Kurutma Havası Akışına Etkisinin Gözenekli Ortam Yaklaşımıyla İncelenmesi

Merdin DANIŞMAZI\*

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye  
\*<sup>1</sup> m.danisman@ahievran.edu.tr

(Geliş/Received: 04/08/2023;

Kabul/Accepted: 12/11/2023)

**Öz:** Pek çok tarım ürününün kurutulduktan sonra depolanması geleneksel bir uygulamadır ve bu şekilde yıl boyu kullanılması sağlanır. Hasadı yapılan tahılın depolama ömrünün artırılması için nem içeriğinin kabul edilebilir seviyelere (genellikle < %15) indirilmesi gerekir. Yığın kurutma prosesinde karışan karşıt akışlı havayla kurutma, en yaygın ve geleneksel yöntemlerden biridir. Bu uygulamada, kurutucu yatağına yerleştirilen hava kanalları sayesinde üretilen hava akışı, tahılların içerisinde tahıl akışına ters yönde akmaya zorlanır. Tahılların içerdiği nem zorlanmış taşınım yoluyla kurutucudan dışarıya atılır. Ancak, kurutuculara yerleştirilen hava kanallarının hem tahıl akışını engellememesi hem de mümkün olan en iyi kurutma performansını sağlaması beklenir. Bu çalışmada, karşıt akışlı bir tahıl kurutucu için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellenmesi yapıldı ve kurutma kanalları geometrisinin prosese etkisi incelendi. Kurutucu içerisindeki 2-boyutlu akış modellenmesi için Fluent 2020 R2 ticari yazılımı kullanıldı. Gözenekli ortam olarak modellenen tahıl bölgesindeki hava akışı, kurutucu hava kanallarının üç farklı geometrisi (dairesel, açısız ve düz) için hesaplamaya dâhil edildi. Tahıla karışmayan kurutma havasının havanın dolaştığı hava kanalları için sabit sıcaklık sınır koşulu (37 °C) uygulandı. Analiz sonucunda, farklı hava akış hızlarının kurutma prosesindeki davranışını belirlemek için 5 farklı giriş hızının (0,005-0,25 arası) kurutucu çıkış sıcaklığı ve akış boyunca fark basınç değişimi hesaplandı. Giriş hızındaki artış, tüm modeller için basınç farkını ve buna bağlı olarak akışın kararlılığını artırdı. Çıkış sıcaklığı ise hızın 5 kat artmasıyla yaklaşık 2,5 °C düşüşe sebep oldu. Elde edilen sonuçlar, nem atma için yeterli çıkış havasının gözenekli ortamın yapısına ve akış geometrisine bağlı olduğunu gösterdi. Bu analiz için en iyi akışın dairesel kesitli model için olduğu ve çıkış sıcaklığının kabul edilebilir seviyelerde olabileceğini ortaya koydu.

**Anahtar kelimeler:** Tahıl kurutucu, kurutma, basınç düşüşü, gözenekli ortam.

### Investigation of the Effect of Duct Geometry on Drying Air Flow in Conventional Grain Dryers by Porous Media Approach

**Abstract:** It is a traditional practice to store many agricultural products after drying, ensuring that they are used all year round. Mixed counter flow air drying is one of the most common and traditional methods in the bulk drying process. In this application, the air flow produced by the air channels placed in the dryer bed is forced to flow through the grains in the opposite direction to the grain flow. The moisture contained in the grains is thrown out of the dryer through forced convection. However, it is expected that the air ducts installed in the dryers should not obstruct the flow of grain and provide the best possible drying performance. In this study, computational fluid dynamics (CFD) modeling for a counter-flow grain dryer was performed and the effect of the geometry of the drying channels on the process was investigated. Fluent 2020 R2 commercial software was used for 2-D flow modeling through the dryer. The airflow in the grain zone, modeled as porous media, was included in the calculation for three different geometries of the dryer air ducts (circular, angular, and straight). A constant temperature boundary condition (37°C) was applied for the air ducts in which the drying air circulated without mixing with the grain. As an output of the analysis, the dryer outlet temperature and differential pressure variation along the flow were calculated for 5 different inlet velocities (between 0.005-0.25) to determine the behavior of different air flow rates in the drying process. The increase in the inlet velocity increased the pressure difference and consequently the stability of the flow for all models. The outlet temperature decreased by about 2.5 °C with a 5-fold increase in velocity. The results showed that the sufficient outlet air for moisture removal depends on the structure of the porous medium and the flow geometry. For this analysis, the best flow was found to be for the circular cross-section model and the outlet temperature could be at acceptable levels.

**Key words:** Grain dryer, drying, pressure drop, porous media.

### 1. Introduction

Millions of people worldwide rely on grain for energy, vitamins, and minerals in their daily diet [1]. The quality of grains can be affected by various factors such as variety, climate, pre-harvest treatments, and technical management. However, post-harvest handling is also crucial to ensure long-term preservation and availability of

\* Sorumlu yazar: [m.danisman@ahievran.edu.tr](mailto:m.danisman@ahievran.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-2077-9237

the product [2]. To maintain grain quality, it is important to avoid physical damage, changes in chemical compositions, and contamination by insects or fungi during post-harvest operations such as drying, storage, and processing [3]. The choice of procedures adopted in these operations can greatly influence grain quality [4-5]. Therefore, it is essential to use modern technologies and appropriate equipment to ensure quality and minimize physical and chemical damage to grains.

When harvesting grain products, the moisture content must be reduced for long-term storage. This is done through dehumidification at appropriate temperatures and airflow rates according to the specific product. Sun drying can be unreliable and lead to contamination and uneven drying, so devices like counter-flow grain dryers are often used. These dryers work by loading moist grains at the top and allowing them to flow down while hot air is simultaneously forced upward through the dryer, removing moisture from the grains. The rate of filling, bulk density, porosity, and permeability all affect the drying process. Drying air temperature is a crucial factor that affects the quality of grain. The use of heated air is an obvious way to dry grains. Heated air has a high vaporization capacity and its enthalpy is increased. Evaporation and internal pressure in grains increase in the presence of additional heating [6-7]. The main advantages of heated air drying are the high drying capacity and shorter drying time, while the disadvantages are the energy cost to heat the air and the damage to the grains due to the increase in temperature [8]. When this temperature is too high or low during the grain-filling stage, it significantly deteriorates the quality of the grain for consumption. This can result in lower yield of processed grain, changes in color and viscosity profile, and altered functional properties, such as gelatinization temperature [9]. Proper grain harvest plays a significant role in maintaining post-harvest grain quality. For larger grains, the ideal harvest water content range is between 19% and 22%, while for medium-sized grains, it is between 22% and 24% [10]. Harvesting grains with low water content results in reduced yields and often leads to cereal grain cracks and breakage due to moisture absorption during milling. To facilitate the logistics and flow of the grain mass during post-harvest stages, especially during receiving and drying operations, it is recommended to harvest grains with a water content between 18% and 23%. Additionally, Lang et al. [11] found that delaying the drying of grains at 25°C leads to phenolic compounds' greater degradation and reduced protein solubility.

Many studies have explored the effective parameters in drying various agricultural products, such as corn and Roman chamomile. It has been found that pressure drop and resistance to flow velocity increase with decreasing moisture content and air temperature [12]. To design an optimal grain dryer for any type of grain, it is important to have knowledge of the grain's physical and thermal properties, including heat and mass transfer, moisture diffusion, activation energy, and energy consumption. During the drying process, heat and mass are transferred between the grains and the drying air [13-14]. For effective drying, the water vapor pressure of the grains must be greater than that of the drying air. If the water vapor pressure of the grains is low, the product will be damp, and if the pressures are the same, a hygroscopic equilibrium will occur between the product and the environment it will be stored in. However, reducing the water content of cereals leads to chemical and physical changes in the product. When water is lost, the grain size decreases due to external pressure, while heating causes the internal pressure to increase. This process exposes the grain to high mechanical stresses that can cause cracks, fissures, and fractures because the grain surface lacks the plasticity or elasticity to support them. Mathematical models are used in drying analysis, as well as in the development and optimization of dryers to describe such phenomena [15-16]. For example, Nowak and Przystupa [17] presented an algorithm for the assessment of the efficiency of grain dryers by calculating energy rating indices including water vapor content, temperature, and dryer capacity.

Some studies suggest the use of additional systems to make the drying process more economical and operative. Scaar et al. [18] used a numerical model based on Computational Fluid Dynamics (CFD) to study the airflow distribution in a mixed-flow dryer and the effect of different bed materials and air duct arrangements. The study found that a horizontal air duct arrangement with one inlet and two diagonal outlets was more effective than one inlet and four outlets, which reduced dryer performance by half [19]. Cao et al. [20] conducted a study to investigate the shape, size, and arrangement of air ducts and their influence on drying characteristics in a mixed-flow grain dryer. For this purpose, they modeled a 60cmx170cm drying duct zone and simulated the effect of duct layout and flow parameters with a computer program. They concluded that increasing the number of ducts increases the dryer capacity and increasing the air flow rate increases the drying effect. As a result, they proposed a small and compact duct layout in dryer ducts. In a CFD simulation study to demonstrate the design effects of air ducts in the dryer [21], air flow distributions were shown and the necessity of designing new dryers was emphasized. In another simulation study of a double bed mixed flow dryer [22], the flow direction of the air in the dryer was altered to spend more time in the grain bed. The modeling changes emphasized the importance of intrinsic permeability, which is the ability of air to pass through the porous medium and has a direct effect on the flow. This parameter depends only on the type of stack and provides accurate results for investigation. Although

new drying techniques and alternative dryers have been developed, these proposed improvements for conventional dryers are still unsatisfactory.

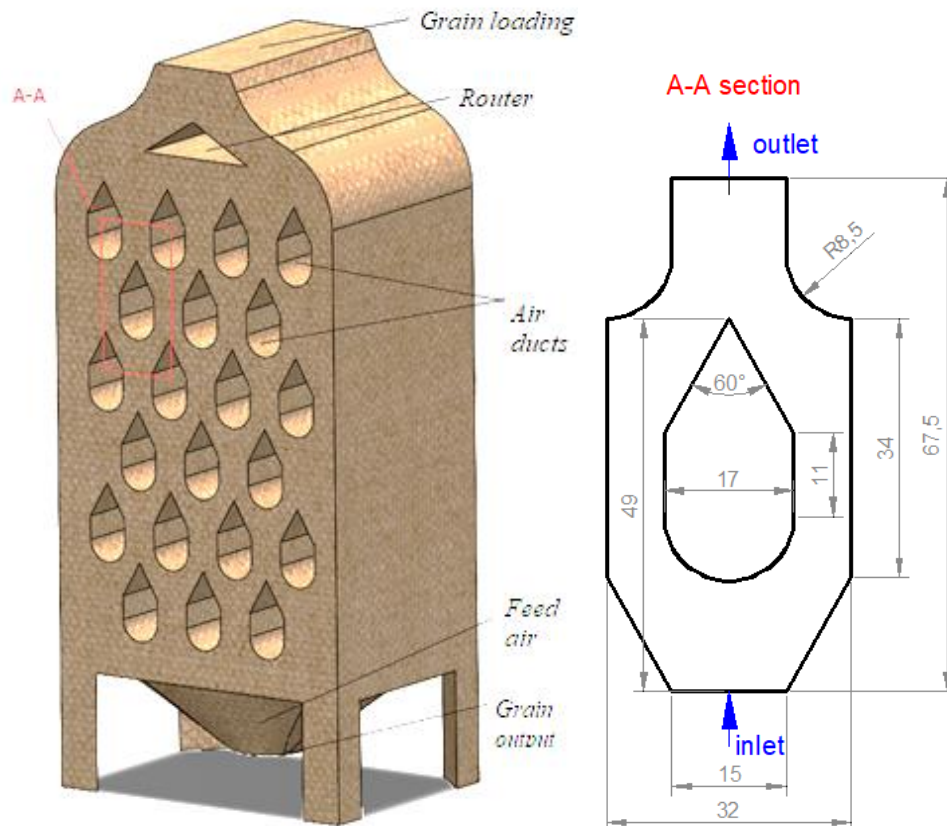
Researchers in particle flow field have shown interest in studying fluid flow through packed bed with particle size using the porous media approach [23-24] which can be adapted to the grain dryers. However, the mathematical modeling of deep bed drying processes, such as mixed flow dryers, is a more extensive topic where grain flow and air flow interact in different ways to exchange heat and mass. The effect of different shapes of flows on the grain and air flows through a mixed flow dryer has already been studied by Klinger [25]. This study focuses on the effects of drying duct shape and pattern on grain dryer.

Numerous dryer designs have been examined in various studies, depending on the type of cereal product that requires storage. However, researchers are continuously seeking to develop the most effective conventional dryer for grain types with differing characteristics in terms of size and shape. In particular, it seems that studies on the shape and layout of the heating air ducts in conventional grain dryers have been insufficient and it is worthy of further study. This study aims to investigate the size and shape factors using a porous media approach and to determine the impact of drying air ducts on average porous media. ANSYS Fluent software was used to model drying ducts in porous media. The duct walls were assumed to have a constant temperature boundary condition, with energy supplied from an external source. The pressure drop across the dryer and other flow parameters related to three different duct sub-geometries allowing the grain to flow were simulated.

## 2. Application and Method

### 2.1. Geometry and modeling

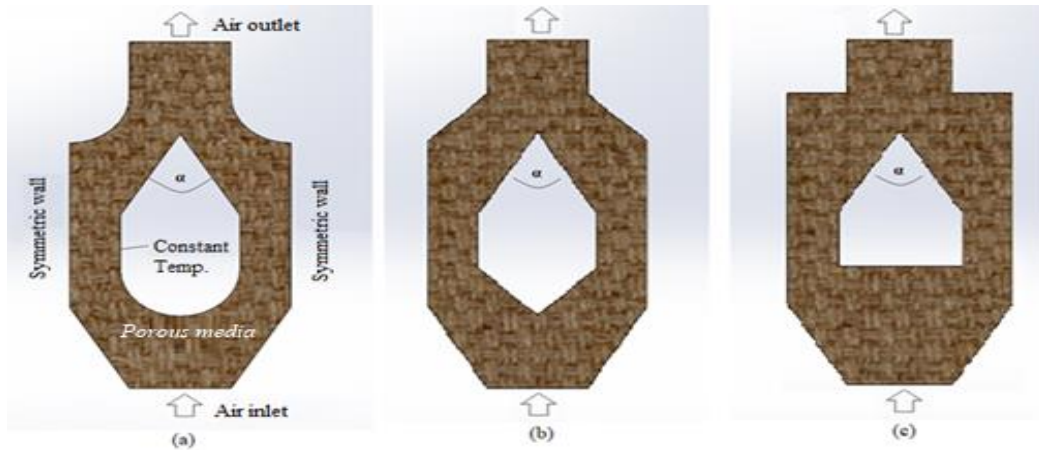
The location of drain dryers is usually at a pressure of 1 atm and at the standard ambient temperature. The flow conditions depend on the grain loading condition and the characteristics of the supplied air. In traditional air dryers, the grain is loaded from the top and flows downwards under its own weight, while the drying air is forced to flow upwards by a fan located at the bottom. The air ducts, which direct both flows and contribute to the drying process, are situated under specific ambient air boundary conditions. This is depicted schematically in Figure 1.



**Figure 1.** Grain dryer schematic and basic drying process with A-A section (cm)

The dimensions of the designed drying channel pattern can be read from this figure. The overall dimensions of the dryer vary according to the loading capacity and their effects on the sectional analysis are not taken into account. Plates at the top and bottom of the dryer guide both grain and air flow into the ducts, ensuring similar flow conditions for each channel. To improve the air conditions in a grain pile, it is possible to adjust the permeability conditions for different types of grain. A-A cross-section is used to represent the flow and drying process inside the dryer. The air enters through a 15 cm wide lower inlet and flows upwards along the drying duct, expanding to a width of 32 cm. Across the flow in the cross-section, the grain particles, and the feed air travel in opposite directions, contacting the heater channel walls. The outlet cross-section has the same width as the inlet. In this type of flow modeling, the permeability can differ in the horizontal and vertical directions. Often, the permeability in the horizontal direction is higher than in the vertical direction, making the medium non-isotropic [26-29].

For this study, we created a model that takes into account the flow around air ducts that do not move. We established a symmetry condition for the side walls. The air ducts were kept at a constant temperature of 37 °C which represents the traditional low speed drying temperature [30]. We analyzed three different duct and flow geometries (circular, angular, and straight edge) while maintaining the dimensional ratios. Figure 2 shows the 2D modeling of the specified duct arrangements.



**Figure 2.** Channel modeling along the flow field a) Circular b) Angular c) Straight

## 2.2. Governing equations for air flow

Drying air flow is assumed to be in continuous medium and incompressible flow conditions. For the energy equations, flow conditions at constant temperature are considered. In this case, the continuity equation can be written as in Equation 1.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

Here  $u = [u, v]$  represents the velocity vector for two-dimensional flow. The basic model for fluid flow in porous media is described by Darcy's law. Ignoring the effect of gravity, the velocity is defined by Equation 2 [24].

$$u = \frac{1}{\mu} K \nabla p \quad (2)$$

Here  $\nabla p (= \Delta p/L)$  is the pressure gradient of flow through a porous media and  $K$  is the permeability coefficient of the porous medium. Permeability is a measurement of the ability of fluids to flow through a multiphase material. It is therefore an important evaluation parameter for flow analysis. In typical grain dryers, the pressure difference for drying air is usually less than 1 kPa. Darcy's law was developed for slow flows and does not fully satisfy the relatively fast flow conditions in dryers. Therefore, the pressure gradient needs to be rewritten to account for high-speed inertial forces. This relationship was presented with the *Blake-Kozeny* and the *Burke-*

Plummer equations and the pressure gradient was redefined by the expression of Ergun (1952) [27] as in Equation 3 [28].

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\mu (1 - \varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} u_m + 1.75 \frac{\rho (1 - \varepsilon)}{d \varepsilon^3} u_m^2 \quad (3)$$

Where  $\Delta p$  is the pressure drop across the cross section,  $\mu$  and  $\rho$  are the dynamic viscosity and density of the fluid, respectively, and  $u_m$  represents the mean velocity in the flow cross section.  $d$  and  $L$  are the inlet cross-section length and flow length, respectively, related to the flow geometry.  $\varepsilon$  in the equation is the porosity expression that enables the porous media approach according to grain type.

The heat transferred along the flow is the heat carried by the drying air and is given as in Equation 4. The outlet temperature is directly related to this expression.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_{air} (T_{in} - T_{out}) \quad (4)$$

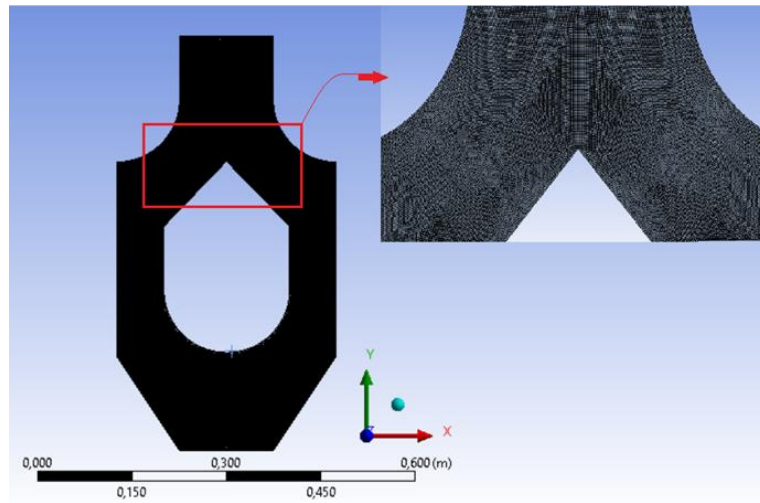
In this equation,  $\dot{m}$  is the mass flow rate,  $C_{air}$  is the specific heat of the flow air. And  $T_{in}$  and  $T_{out}$  represent the inlet and outlet temperatures respectively. The properties of the air used for the flow are given in Table 1.

**Table 1.** The Properties of the Fluid

Fluid	Temperature [°C]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Dynamic viscosity [Pa.s]	Specific heat [J/kgK]	Thermal Conductivity [W/mK]
Air	27	1.225	$1.7948 \times 10^{-5}$	1006.43	0.0242

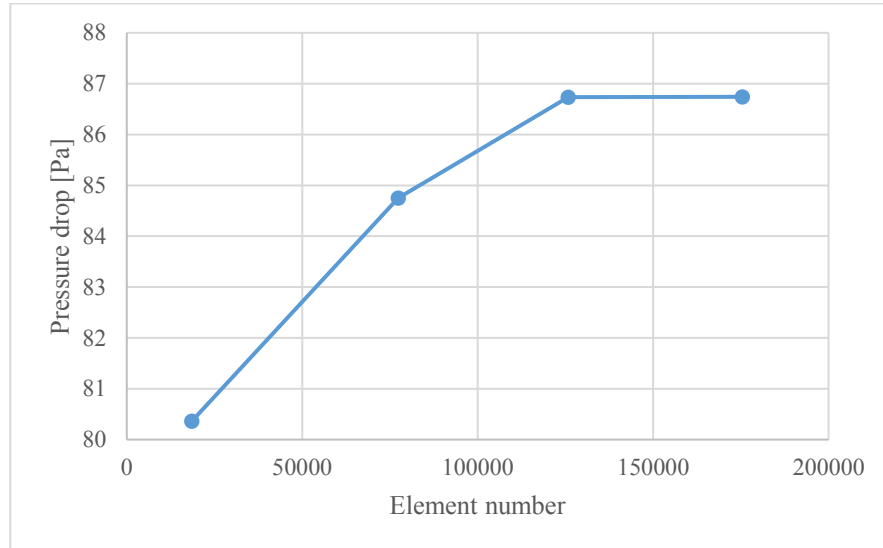
### 2.3. Mesh independence test

In finite element analysis, it is important to prove the independence of the results from the number of cells or nodes. To reduce the impact of the number of elements on the results, we aimed to minimize its dependence by practicing trials of an increase in the number of cells for circular model. We modeled a flow field and conducted four finite element applications with increasing cell numbers. These were 18575, 77364, 125833, and 175422 total cell numbers, with a focus on the denser mesh near the solid edges. The outlet temperature results obtained according to the increase in the number of cellular elements are 31.28, 32.17, 32.48 and 32.482 Pa, respectively. The distribution of cell division can be seen in Figure 3.



**Figure 3.** Finite element model

The results for the pressure drop remained nearly stable after the third cellular analysis, as shown in Figure 4. To prevent lengthy analysis times and issues with computer memory, subsequent calculations were performed using a cell number of 125833.



**Figure 4.** Change of dependency on cell number

### 3. Results and Evaluation

#### 3.1. Simulation settings

The system consists of a continuous medium in both horizontal and vertical directions. Air enters at the bottom of the model with an inlet velocity and leaves from the top by flowing over the surface of the ventilation ducts. The temperature is kept constant at 37 °C as required by the assumption of the constant surface temperature boundary condition. The convergence criterion for velocity and momentum conservation is  $10^{-5}$ . But, for energy conservation, it is  $10^{-6}$ . The continuity equation error is  $10^{-9}$ . The porous medium is defined as wood, the air ducts as steel, and the fluid as air. The y-direction permeability is three-quarters of the x-direction permeability. It is clear that in the case of grain loading, the permeability effect will decrease in the gravity direction due to the bulk effect. In other words, the flow capability of the drying air in the y-direction is slightly less than in the x-direction. This effect varies according to the grain density. This was considered as an average effect. Permeability was left as default in these conditions for analysis according to the wood grain bulk. And the value of porosity was selected as 0.1 as an average value which it is allowable value for a grain bulk [29]. The simulation is run five times, with normal inlet air velocities ranging from 0.05 m/s to 0.25 m/s in all three modes. The spatial discretization is quadratic for all parameters, and the pressure-velocity related solution method is chosen as Couple. The initial convergence is taken as Hybrid. The study is conducted on a computer with 32 GB RAM and a 10-core i7 processor, and each run takes about 3 hours.

#### 3.2. Validation of the model and solution

The study compared the results of its porous media modeling with that of Timo Oksanen [22], which had a similar approach. Figure 5 illustrates this comparison, displaying the relationship between inlet velocity and pressure drop. It was found that the outcomes for inlet conditioning at low Re numbers were similar and consistent with one another. Similarly, the increase in pressure drop with increasing volumetric flow rate of drying air in a conventional grain dryer was demonstrated in the study of Misr et al [30]. It is confirmed from that study that this increasing trend does not change for different humidity and temperature conditions.

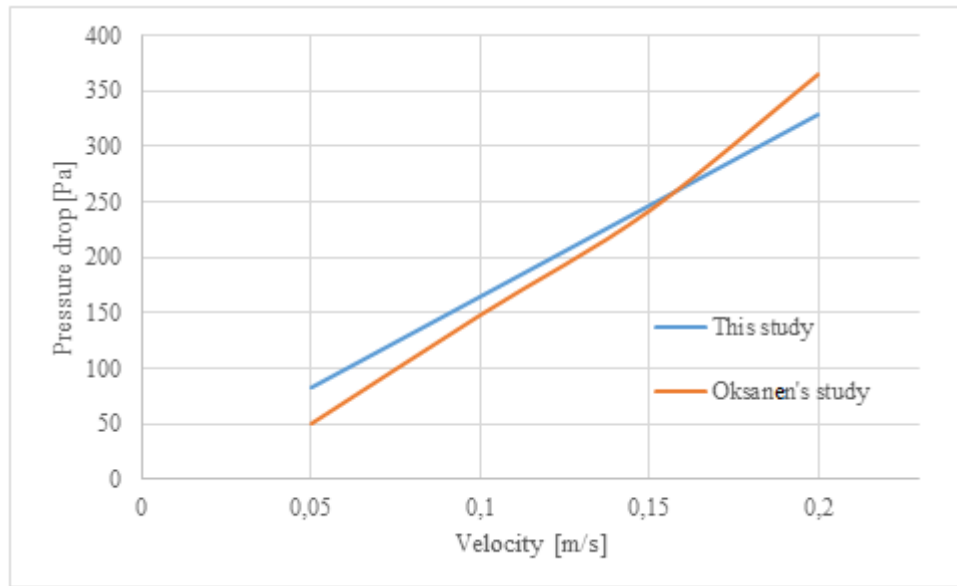


Figure 5. Validation of the analysis

### 3.3. Flow parameters in nonporous media

Flow analysis in non-porous media involves the study of the variation of standard air flow through geometric obstacles. It is used to determine the extent of heat transfer from air to surfaces or from surfaces to air. In this study, firstly, the models with only air flow were analyzed to determine the behavior of velocity, temperature and pressure variations in the medium. To analyze the behavior of the air flow in the modeled geometries, an analysis was conducted on a non-porous medium with the same initial and boundary conditions as the proposed system. The resulting velocity, pressure, and temperature contours can be seen in Figure 6. The fluid flow is uniformly directed from the surfaces of the channel towards the outlet. As expected, the maximum pressure drop occurs in the outlet region. The constant temperature channels exert a drying effect on the flow throughout the defined zone. As expected, in all three models, high velocity and low pressure combinations occur in the narrowed channels. The obtained maximum velocity value of 0.0627 m/s is considerably higher than that of the porous medium. Similarly, it is seen that low pressure conditions are formed.

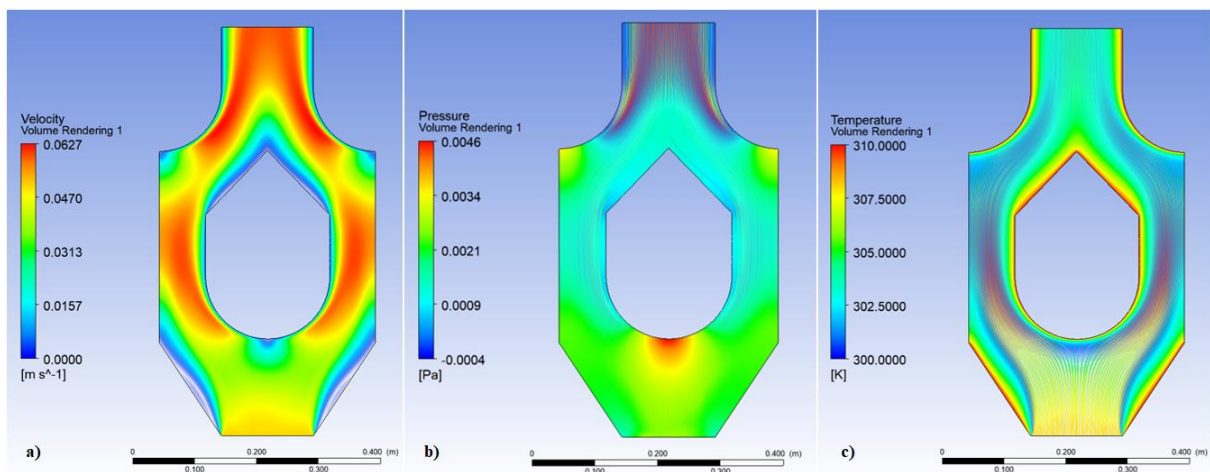


Figure 6. Flow contours in a hollow flow region a) Velocity b) Pressure c) Temperature

### 3.4. Flow parameters in porous media

#### 3.4.1. Velocity contours

The results of modeling three different models with a normal inlet velocity of 0.01 m/s are shown in Figure 7. It is crucial that the airflow during the drying process moves in a continuous and controlled upward direction. The straight-sided duct model showed irregular pressure distribution, hindering the flow. While the angular model partially ensured flow continuity, the circular edge model exhibited the highest exit velocity and uniform velocity distribution. In all three models, although much lower velocity gradients than in the non-porous medium were observed, it was found that flow was almost non-existent in the straight model. In the proposed circular model, the corner areas, which can be called dead volume, are significantly eliminated.

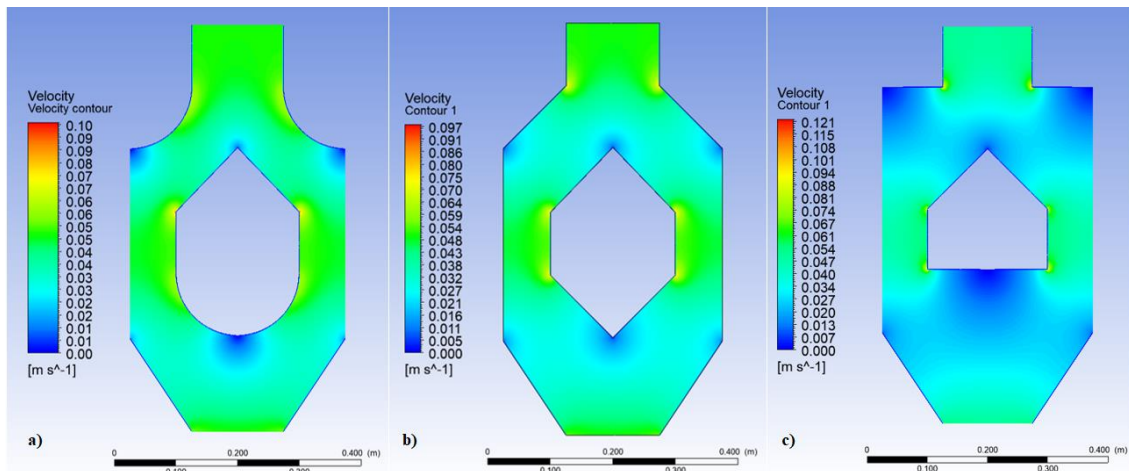


Figure 7. Velocity contours a) Circular b) Angular c) Straight

#### 3.4.2. Pressure contours

In most channel flow models, the velocity distribution often also gives insight about pressure variations. However, for this study involving porous media, it is useful to see this tendency. As seen in Figure 8, the pressure contours and their relationship with the surface geometries remain consistent for all three models under the same initial and boundary conditions. However, it is important to note that the straight model has the lowest pressure gradients. It is anticipated that the fluid's entry will lead to a high-pressure region, and this is true for all three models. However, it is evident that the circular edge model provides the most uniform pressure distribution for the flow. This trend aligns with the findings of Scaar's study [31] reported in the literature.

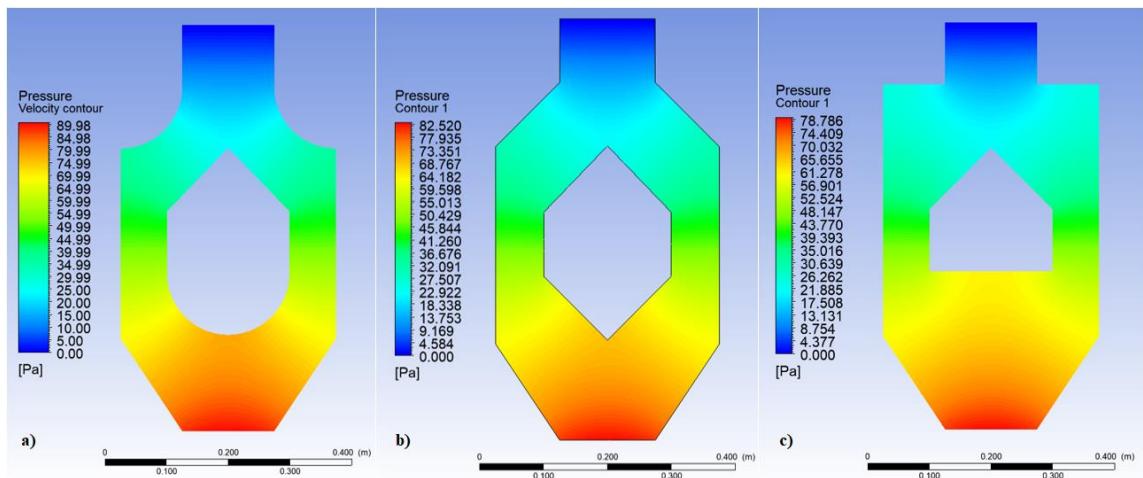


Figure 8. Pressure contours a) Circular b) Angular c) Straight



### 3.4.3. Temperature contours

The purpose of including pressure and temperature contours in the analysis is to achieve the desired airflow. In this way, it can be possible to ensure steady conditioning across the cross-section. However, the temperature distribution in the flow zone is also crucial for effective drying. The ducts with constant temperature conditions gradually dry the grains and heat the flowing air throughout the entire flow zone. Figure 9 displays the temperature contours for all three models at the same flow rate. The circular edge model exhibited the earliest heating along the duct, compared to the straight and angular edge models.

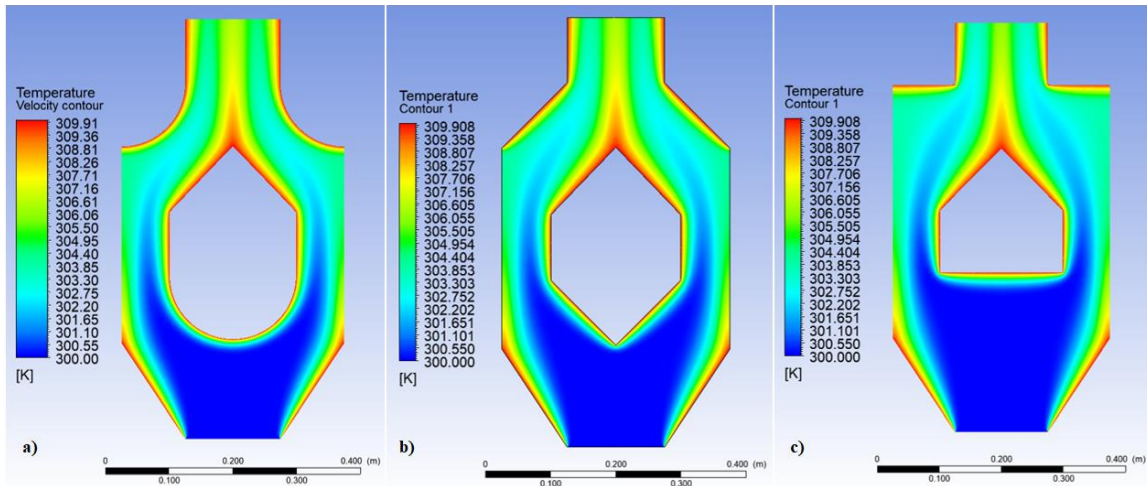


Figure 9. Temperature contours a) Circular b) Angular c) Straight

### 3.5. Comparison of the effects of flow field models

For the flow geometry, the pressure drops show the difference between the inlet and outlet pressures. However, it should be noted that the boundary conditions for the flow problem in the channel geometry are defined as velocity inlet and pressure outlet. Therefore, the pressure value calculated at the outlet of the modeled geometry gives the pressure drop across the flow. This information can tell us how well the drying air flows. If the pressure drop increases, it means less pumping power is needed. On the other hand, if the pressure drops are close to zero or negative, it negatively affects the flow's condition, making it inconsistent. By increasing the velocity of the inlet drying air, the flow through the porous media is expected to be faster. Figure 10 shows the pressure drops and outlet air temperature for all the models. This was observed for all three models. In the circular model, the total pressure drop across the drying section is the highest for all flow rates. This means that systematically higher outlet temperature values will result.

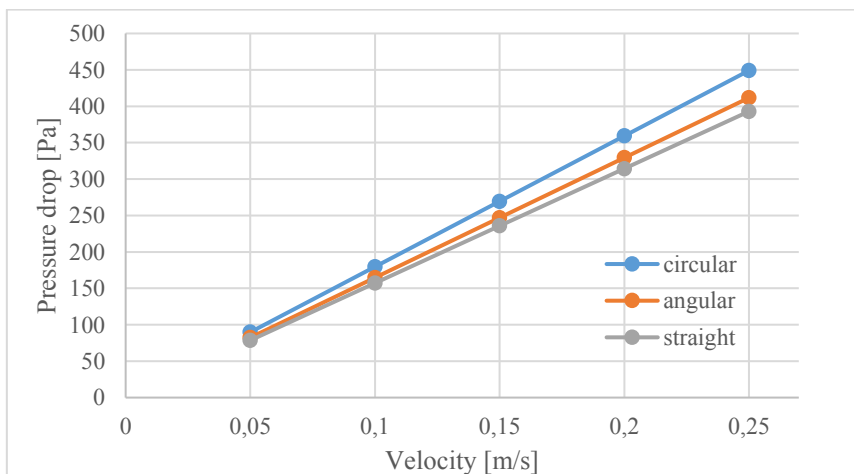
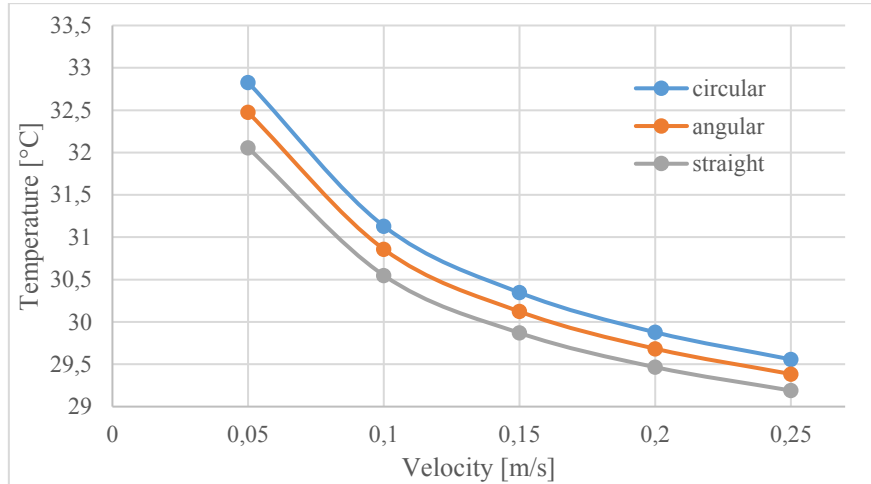


Figure 10. Variation of pressure drop

This effects can be observed for all duct geometries and is illustrated in Figure 11. Further analysis, while keeping the porosity constant, revealed that the outlet temperature of the dryer decreases as the velocity increases. The circular channel geometry demonstrated the highest outlet temperature values, which suggests that lower pump power is required to achieve the desired outlet temperature.



**Figure 11.** Variation of outlet temperature

Although the heat transfer and thus drying effect under constant porosity and permeability has been demonstrated in this way, it would be useful to continue studies involving different grain sizes and bulk effects in order to develop specific dryers.

#### 4. Conclusion

When drying grain, conventional dryers often use ambient air that has been pre-treated. However, the geometry of the flow ducts and channels is a crucial factor in achieving optimal drying. This study examined the effects of three different channel geometries (circular, angular, and straight) on drying. The dryer medium was represented by porous media to simulate different grain sizes. The study evaluated the impact of these geometries on drying under a fixed porous media condition, analyzing five different inlet velocities ranging from 0.05 m/s to 0.25 m/s. Results showed that an increase in the inlet flow rate led to an increase in pressure drop for all geometries, as expected. However, this also indicated beneficial air supply conditions for the specified dryer type. Additionally, the study noted the change in outlet temperature with pressure drop for porous media conditions representing various grain bulks. The circular duct model was found to require less pump power and result in better drying ambient conditions compared to the straight and angular models. Therefore, the study concluded that changing the duct geometry alone can lead to an improvement of over 10%. This research demonstrates the importance of studying porous media and drying air in grain drying processes, providing valuable insights for dryer design. A considerable number of studies investigating the flow and heat transfer along the flow in standard empty channel flows are available in the literature. And efforts to improve them according to fluid and channel geometries are ongoing. The study of flow with porous media conditioning is also among the popular topics of the last decade. However, studies on the channel and porosity representing grain drying need to be improved. This study reveals that many of the comparison parameters of these approaches can be used in conventional grain drying and an optimal dryer design can be developed for a given drying process.

#### References

- [1] H. Duan, H. Tong, A. Zhu, H. Zhang ve L. Liu, Effects of heat, drought and their combined effects on morphological structure and physicochemical properties of rice, *Journal of Cereal Science*, Vol. 95, no. 103059, 2020.
- [2] E. Elert, Rice by the numbers: A good grain, *Nature*, Vol 514, no. 7524, p. S50+, 30 Oct. 2014.
- [3] P. C. Coradi, C. H. P. Fernandes ve &. J. C. Helmich, Adjustment of mathematical models and quality of soybean grains in the drying with high temperatures, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 20, no. 4, pp. 385-392, 2016.

- [4] Z. M. Shad ve G. Atungulu, Post-harvest kernel discoloration and fungi activity in long-grain hybrid, pureline and medium-grain rice cultivars as influenced by storage environment and antifungal treatment, *Journal of Stored Products Research*, Vol. 81, no. ISSN 0022-474X, pp. 91-99, 2019.
- [5] B. J. Olorunfemi ve S. E. Kayode, Post-Harvest Loss and Grain Storage Technology- A Review, *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, Vol. 9, no. 1, p. 75–83, 2021.
- [6] N. L. de Menezes, L. L. Pasqualli, A. P. Piccinin Barbieri, M. D. Vidal and G. M. Conceição, Drying temperatures on physical integrity, physiological quality and chemical composition of rice seeds, *Pesquisa Agropecuária Tropical*; Goiânia, Vol. 42, no. 4, pp. 430-436, 2012.
- [7] N. Donla, Y. Matsushita and Y. Ogawa, Influence of postharvest drying conditions on resistant starch content and quality of non-waxy long-grain rice (*Oryza sativa* L.), *Drying Technology*, vol. 36, no. 8, pp. 952-964, 2018.
- [8] L. P. Mussi, A. O. Guimarães, K. S. Ferreira ve N. R. Pereira, Spouted bed drying of jambolão (*Syzygium cumini*) residue: Drying kinetics and effect on the antioxidant activity, anthocyanins and nutrients contents, *LWT - Food Science and Technology*, cilt 61, no. 1, pp. 80-88, 2015.
- [9] M. K. d. Guzman, S. Parween, V. M. Butardo, C. M. Alhambra, R. Anacleto, C. Seiler, A. R. Bird, C.-P. Chow ve N. Sreenivasulu, Investigating glycemic potential of rice by unraveling compositional variations in mature grain and starch mobilization patterns during seed germination, *Nature Publishing Group UK-Scientific reports*, vol. 7, no. 1, p. 5854, 2017.
- [10] T. J. Siebenmorgen, R. C. Bautista ve P. A. Counce, Optimal harvest moisture contents for maximizing milling quality of long-and medium-grain rice cultivars, *Applied Engineering in Agriculture*, Vol.23, no. 4, pp. 517-527, 2007.
- [11] G. H. Lang, B. A. Rockenbach, C. D. Ferreira ve M. & de Oliveira, Delayed drying interval of red rice: Effects on cooking properties, in vitro starch digestibility and phenolics content, *Journal of stored products research*, Vol. 87, no. 101613, 2020.
- [12] S. Cenkowski, S. Pabis and D. S. Jayas, *Grain Drying: Theory and Practice*, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [13] Mortaza Aghbashlo et al., Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy, *Energy Conversion and Management*, p. 2865–2871, 2008.
- [14] M. Danismaz and C. Demirtaş, Investigation of the Relationship Between the Core Temperature of Hazelnuts, *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, pp. Vol. 7-No.1, pp. 29-34, 2021.
- [15] P. C. Coradi, Â. F. C. Lemes, S. J. Ibagé, A. Müller ve C. Z. Alves, *Mathematical Modeling of Drying in a New Concept of Silo-Dryer-Aerator and the Quality of Soybean Seeds*, 2018.
- [16] P. Coradi ve Â. F. Lemes, Experimental prototype of silo-dryer-aerator of grains using Computational Fluid Dynamics (CFD) system, *Acta Scientiarum - Technology*, vol. 41, no. e36949, 2019.
- [17] P. Przystupab, W. Wojciech and J. Nowaka, Methods for assessing energy efficiency, *Agricultural Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 39-47, 2019.
- [18] H. Scaar, G. Franke, F. Weigler, M. Delele and E. T. & J. Mellmann, Experimental and numerical study of the airflow distribution in mixed-flow grain dryers, *Drying Technology*, vol. 34, no. 5, pp. 595-607, 2016.
- [19] H. Silva, C. Schepke, C. da Cruz Cristaldo, D. de Oliveira and N. Lucca, "An Efficient Parallel Model for Coupled Open-Porous Medium Problem Applied to Grain Drying Processing," *Latin American High Performance Computing Conference*, High Performance Computing, vol. 1540, p. pp 250–264, 2021.
- [20] C. W. Cao, D. Y. Yang ve Q. Liu, Research on modeling and simulation of mixed flow grain dryer, *Drying Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 681-687, 2007.
- [21] F. Weigler, H. Scaar ve J. Mellmann, Investigation of particle and air flows in a mixed-flow dryer, *Drying Technology*, cilt 30, no. 15, pp. 1730-1740, 2012.
- [22] T. Oksanen, "Controlling air flow in recirculating mixed flow batch dryer with double bed mode," *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. Volume 149, Pages 133-138, June 2018.
- [23] S. Ergun ve A. A. Orning, Fluid Flow through Randomly Packed Columns and Fluidized Beds, *Ind. Eng. Chem., American Chemical Society*, vol. 1, no. 241, p. 1179–1184, 1949.
- [24] L. Amiri, S. A. Ghoreishi-Madiseh, F. P. Hassani ve A. P. Sasmito, Estimating pressure drop and Ergun/Forchheimer parameters of flow through packed bed of spheres with large particle diameters, *Powder Technology*, cilt 356, pp. 310-324, 2019.
- [25] A. Klinger, *Artificial Patterns*, *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 4, pp. 301-306, 1977.
- [26] S. Pabis, D. Jayas ve S. Cenkowski, *Grain Drying: Theory and Practice*, New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [27] S. Ergün, "Fluid flow through packed columns," *Chemical Engineering Prog.*, Vol. 48, pp. 89-94, 1952.
- [28] M. Helsen, J. Mayerhofer, N. Govaerts, H. Parmentier ve L. Jeanmart, Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles, *Powder Technology*, vol. 205, no. 1–3, pp. 30-35, 2011.
- [29] Glover, P.W.J., Luo, M. The Porosity and Permeability of Binary Grain Mixtures. *Transp Porous Med* 132, 1–37 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01378-0>.
- [30] N. H., Abou-El-Hana ve M. A. Younis, Pressure Drop Through Shelled Corn As Affected By Airflow Rates, Moisture Content And Air Temperature, *Process Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 944-956, 2008.



## Asker Dağı (Elazığ) Güneybatısında Yer Alan Mafik Volkanik Kayaçların Konfokal Raman Spektroskopisi ile İncelenmesi

Mutlu Ercan ÇELİK<sup>1</sup>, Melek URAL<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>1</sup> mutluercancelik@gmail.com, <sup>2</sup> melekural@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 30/05/2023;

Kabul/Accepted: 09/12/2023)

**Öz:** Asker Dağı (Elazığ) güneybatısında yüzeyleme veren Yüksekova Karmaşığı'na ait mafik volkanik kayaçlar Konfokal Raman Spektroskopisi ile incelenmiştir. Mafik volkanik kayaçlar, karşılaştırılan alanlarda petrografik açıdan hemen hemen homojenlik gösterirken, kısmen dokusal ve alterasyon türleri bakımından çeşitlilik gösterirler. Plajiyoklas + piroksen ± olivin'in egemen olduğu ekstrüvizif kayalarda; porfirik, amigdaloidal, mikrolitik dokular gözlenebilmektedir. Belli bir lokasyonda karakteristik bir bileşim ya da dokusal özellik ayırtlanamazken, alterasyon özellikleri türüne göre bazı lokasyonlarda baskın gözükebilmektedir. Opaklaşma, silisleşme, spilitleşme, killeşme, kloritleşme, karbonatlaşma ve serpantinleşme türünde alterasyonlar olağan şekilde gözlenmektedirler. Bu çalışmada mafik volkanik kayalar genel olarak spilitik bazalt, amigdaloidal bazalt, piroksen bazalt nadiren ise dolerit olarak tanımlanmışlardır. Çalışma bölgesinde yüzeyleme veren bazaltik bileşimli volkanik kayaç örneklerinde bulunan piroksen, plajiyoklas ve bazı opak mineraller üzerinde gerçekleştirilen Konfokal Raman Spektroskopisi analizleri neticesinde birincil olarak; ojit, diyopsit, albit, labradorit, manyetit; ikincil olarak ise epidot ve hematit' mineralleri saptanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Asker Dağı, Yüksekova Karmaşığı, Konfokal Raman Spektroskopisi.

### Investigation By Confocal Raman Spectroscopy of Mafic Volcanic Rocks in the Vicinity of North of Asker Mountain (Elazığ)

**Abstract:** Mafic volcanic rocks belonging to the Yüksekova Complex, which outcrops in the southwest of Asker Mountain (Elazığ), were examined with Confocal Raman Spectroscopy. While mafic volcanic rocks are almost petrographically homogeneous in the compared areas, they partially vary in terms of textural and alteration types. In extrusive rocks dominated by plagioclase + pyroxene ± olivine; porphyritic, amygdaloidal and microlithic textures can be observed. While a characteristic composition or textural feature cannot be distinguished in a certain location, alteration features may seem dominant in some locations depending on their type. Alterations such as opacification, silicification, spilitization, argillization, chloritization, carbonation and serpentinization are normally observed. In this study, mafic volcanic rocks are generally defined as spilitic basalt, amygdaloidal basalt, pyroxene basalt and rarely dolerite. As a result of Confocal Raman Spectroscopy analyzes performed on pyroxene, plagioclase and some opaque minerals found in basaltic composition volcanic rock samples outcropping in the study area; augite, diopside, albite, labradorite, magnetite; Secondly, epidote and hematite minerals were detected.

**Key words:** Asker Mountain, Yüksekova Complex, Confocal Raman Spectroscopy.

#### 1. Giriş

Çalışma alanı Elazığ ili doğusunda başlıca Asker Dağı çevresi, Fahribey mezarı, Fahribeyköy, Soğanlı köyleri civarındadır (Şekil 1). Bu alanda Yüksekova Karmaşığı (YK) biriminin mafik volkanik kayaları bölgede hâkim magmatik birimleri oluşturur. Kuzeyde Keban platformu güneyde ise Arabistan platformu ile temsil edilen mikrolevhalar arasındaki çarpışma ve yükselim süreçlerine bağlı olarak gelişen yığılma ürünü olarak birim, Geç Kretase döneminde yitim ve okyanuslaşma süreçleriyle karmaşık niteliği kazanmıştır [1]. Birim, kırmızı-yeşil kireçtaşı, şeyl, kumtaşı, volkanik kumtaşı, tuf, aglomera, bazalt, diyabaz, gabro, serpantin, granit ve granodiyoritlerle temsil olunan okyanusal ada yayı ürünleri olarak tanımlanır [2-3].

Jeolojik [2-25], jeokimyasal [17-19, 21-22, 24] açıdan irdelenen birime ait mafik volkanitler bu çalışmada Konfokal Raman Spektrometre analizleriyle mineralojik açıdan ele alınmıştır.

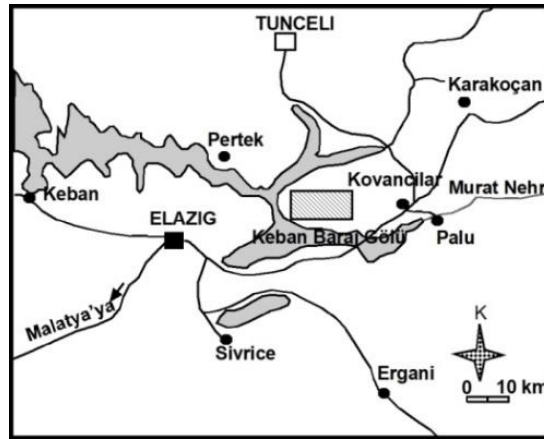
\* Sorumlu yazar: [melekural@firat.edu.tr](mailto:melekural@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-4034-8613, <sup>2</sup> 0000-0002-4174-6058

## 2. Materyal ve Metot

Kayaçların mineralojik bileşimlerinin saptanması amacı ile seçilen 7 adet bazaltik bileşimli örnek üzerinde 25 noktada Ankara Üniversitesi YEBİM Mineraloji-Petrografi Araştırma Laboratuvarları'nda Horiba Jobin Yvon Labram HR model Raman Konfokal Spektrometresi cihazı yardımıyla analiz edilmiştir. Cihazın Lazer dalgaboyu: 633 nm, Allowed range: 3623-25-1, Açıklık: 25 µm, Lazer gücü (max. 7 mW): 7, tahmini çözünürlük: 2.6-4.4 cm<sup>-1</sup>, tahmini spot boyu: 0.7 µm, Min. Aralık sınırı cm<sup>-1</sup>: 100-1200, Objektif: Mplan 100x0.90 BC dir.

## 3. Jeoloji

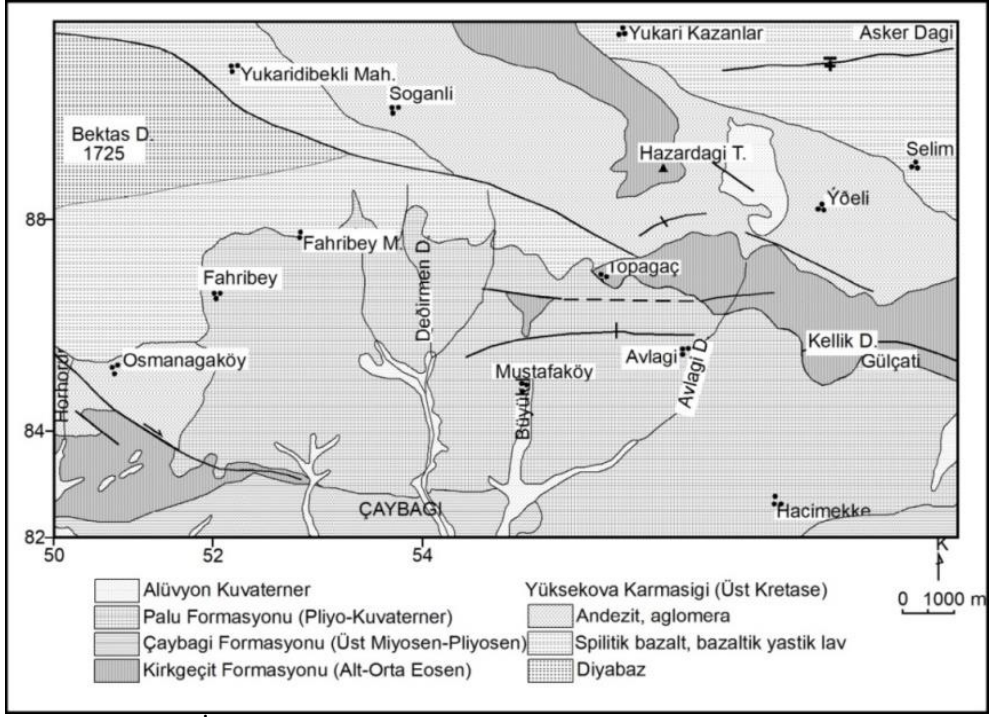
Çalışma alanı Bitlis Sütur zonu üzerinde yer alan Elazığ İli'nin yaklaşık 50 km doğusunda yer almaktadır (Şekil 1, 2). İnceleme konusunu oluşturan ve bu alandaki tek magmatik birim Üst Kretase yaşlı Yüksekova Karmaşığı (YK) dır. Diğer birimler daha genç sedimanter ve örtü birimleri olup Bartoniyen-Priyaboniyen yaşlı Kırkeçit Formasyonu [26-28]; Alt Pliyosen yaşlı Çaybağı Formasyonu ile Pliyo-Kuvaterner yaşlı Palu Formasyonu birimleri olup [10, 29-30]. YK, tabanda yer yer diyabaz-gabrolarla başlayıp üste doğru bazalt-bazaltik yastık lav ve lav akıntıları, andezit, andezitik lav akıntıları, aglomera, şeyl, marn ve volkanik kumtaşları ile devam eden bir istif ile temsil olunur [3, 7, 9, 17-18, 24]. Yüksekova Karmaşığı (YK) bazik volkanitlerinin yay içi karakteri gösteren Senomaniyen-Turoniyen ile yay ardi karakteri gösteren Santoniyen-Kampaniyen yaşlı iki farklı karakterdeki kaya grubundan oluşmaktadır [18, 31, 19, 32] belirtir.



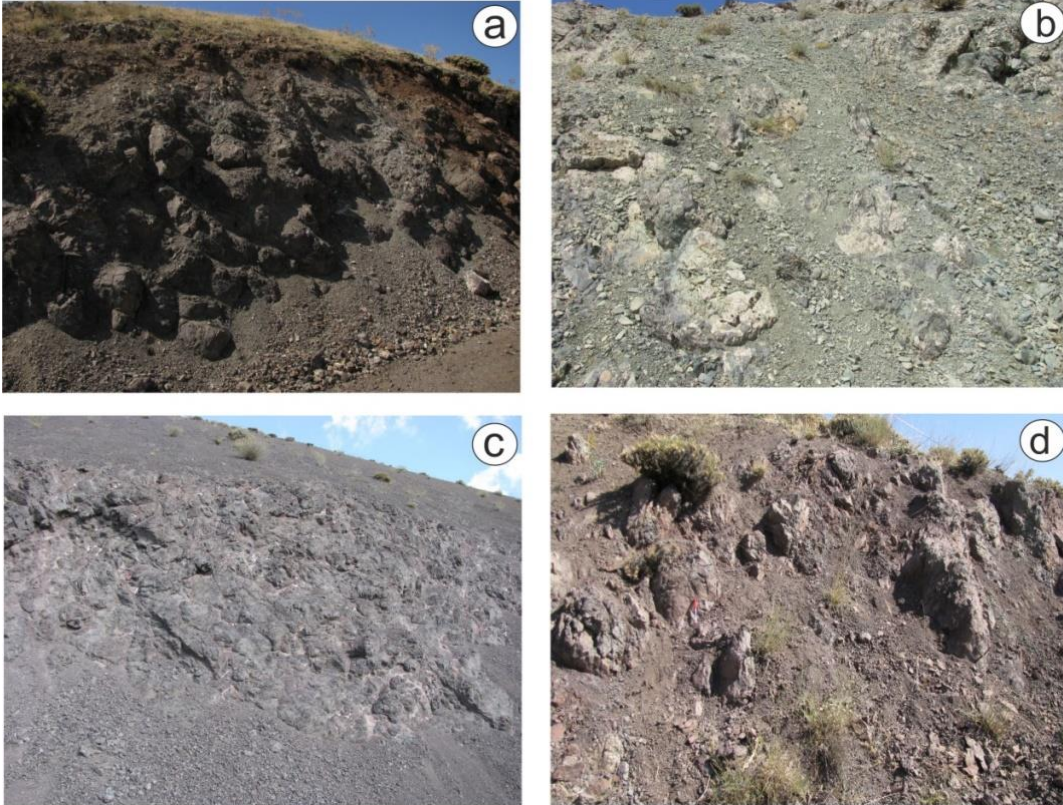
Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası.

Mafik volkaniklerden yastık lavlar (Şekil 3), Asker Dağı kuzeyi yamaçları, Fahribey mezarası kuzeyi, Fahribey Köy batısındaki yol yarmalarında, Soğanlı dolaylarında yüzeylerken (Şekil 3 a-d), andezit ve aglomera araldanmaları ise batıdaki yüzleklerde (Şekil 3 a-d) izlenebilmektedir [17, 19, 25]. Volkanik birim üzerine uyumsuz olarak filiş özelliğinde volkanotortullar yüzeyler (Şekil 3 a-d). Yastık lavlar, bu alanda elipsoidal-tüpler şeklinde, 20-30 m çaplarında, bol amigdüllü, nispeten düşük yoğunluktadır [25].

Dasit, riyodasit, riyolit bileşimindeki stok ya da dayklar yaygın olarak bazik lav ve volkaniklastik birimleri farklı açılardan: enine, düşey yada vev olarak kesmektedir [7, 9, 17, 24]. Bazaltik yastık lavlarla birincil stratigrafik ilişkili mikritik kireçtaşları, Geç Kampaniyen-Maastrichtiyen periyodunda Neotetis Okyanusu'na ait bir basen yamacı ya da derin şelf kenarında depolanmışlardır [23]. Asker Dağı çevresindeki pelajik kireçtaşları Globotruncana cf. falsostuarta SIGAL fosiline dayanarak Geç Maastrichtiyen yaşı verilirken [23], Fahribeyköy çevresinde yüzlek veren pelajik kireçtaşlarındaki Marginotruncana carinata Dalbiez, Globotruncana linneiana (d'Orbiny) fosillerine dayanarak Maastrichtiyen yaşı verilmiştir [5]. Diğer yandan karmaşık içerisindeki kırmızı renkli kireçtaşlarından derlenen fosil içeriklerine göre, Kampaniyen-Maastrichtiyen yaşı [3]; bölgedeki plütonik kayaçlar, volkanitler ve anklavlara dayalı radyometrik yaş bulgularına göre, Geç Kretase [34-35] olarak yaşlandırılır.



Şekil 2. İnceleme alanının jeoloji haritası [17, 29, 33'den değiştirilerek].



Şekil 3. İncelenen lokasyonların arazi görünüşleri: **a.** Elipsoidal lobsu, 20-30 cm çaplarında sediman ara dolgulu yastık lavlar. Asker Dağı etekleri, **b.** Volkanik kırıntılılarla ardalanmalı spilitik lav ve lav breşleri. Fahribey mezarısı kuzeyi, **c.** Yastık lavlar üzerinde filişoidal kırıntılılar. Asker Dağı etekleri. BY:345, **d.** Amigdaloidal bazalt bileşimli altere yastık lavlar, Soğanlı Mezarısı.

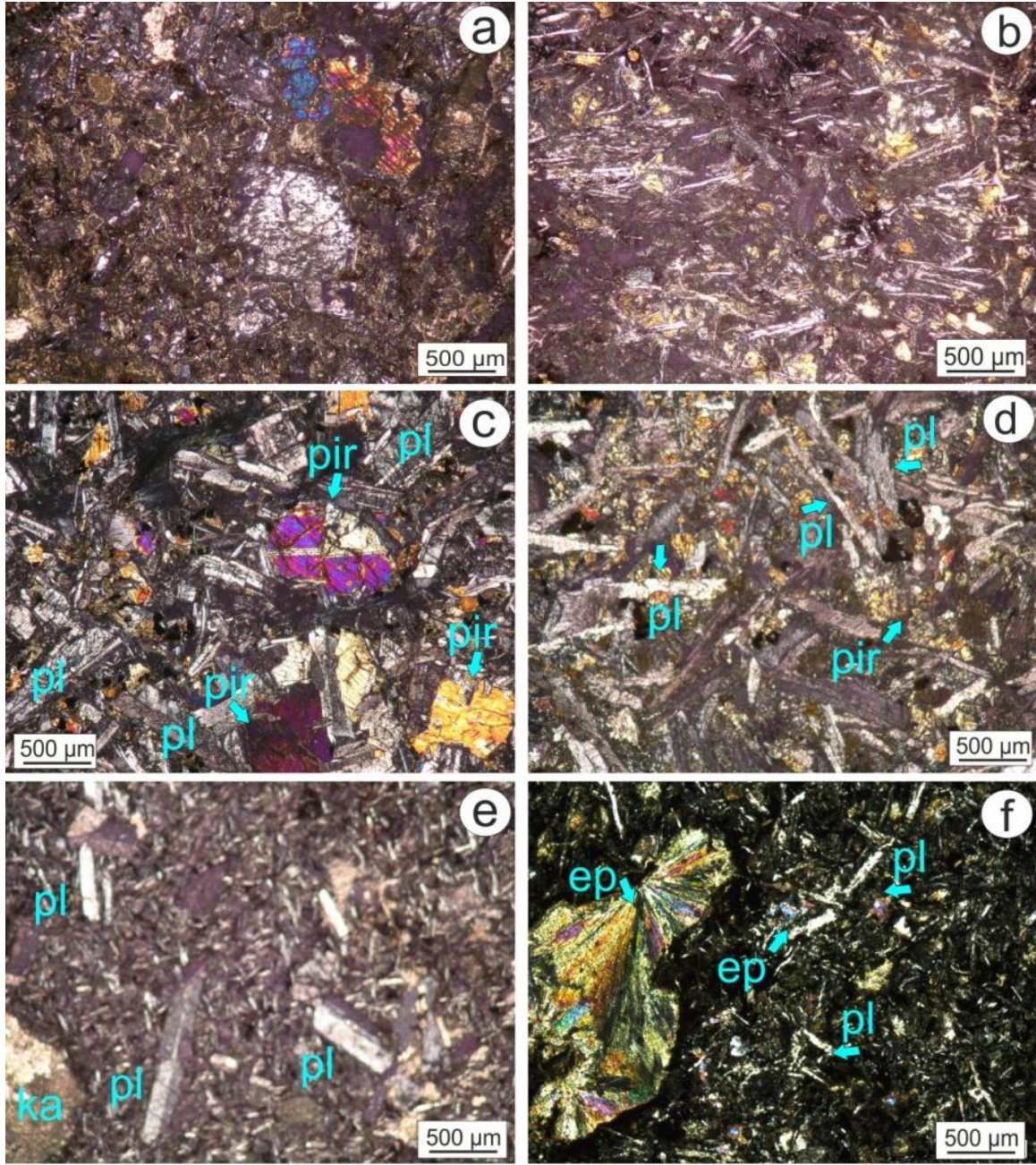
#### 4. Petrografi

İncelenen mafik volkanik kayalar bölgelere göre ele alınmıştır (Tablo 1, Şekil 4). Başlıca Asker Dağı, Fahribey-Fahribeyköy civarındaki gözlemler Tablo 1’de detaylı olarak irdelenmiştir.

**Tablo 1.** İnceleme bölgesindeki mafik volkanik kayalara ait petrografik gözlemlerin özeti

Lokasyon	Asker Dağı	Fahribey mezası K i	Fahribeyköy K ve KB sı	Soğanlı
<b>Mineraller (%)</b>	plajiyoklas (% 25-55), piroksen (%15-35), opak mineral (%5-20), ± olivin (%5-15)	plajiyoklas (%45-60), piroksen (% 20-45), opak (%5-10)	plajiyoklas (% 40-60) ve piroksen (% 20-40)	plajiyoklas (%30-50), piroksen (%10-30), opak mineral (%5-25)
<b>Doku</b>	Amigdaler, Hiyalomikrolitik/ Mikrolitik porfirik,	Doleritik, İntergranular, Poikilitik	Amigdaler, Sferulitik İntergranüler intersertal, Varyolitik, Glomeroporfirik	Amigdaler, İntergranüler, İntersertal,
<b>Kaya Adı</b>	Spilitik bazalt, Amigdaler bazalt, Piroksen bazalt	Dolerit / Bazalt	Spilitik bazalt	Bazalt
<b>Alterasyon</b>	Opaklaşma, Karbonatlaşma, Spilitleşme, Kloritleşme	Opaklaşma, Karbonatlaşma, Epidotlaşma,	Opaklaşma, Karbonatlaşma, Spilitleşme, Kloritleşme, Silisleşme	Opaklaşma, Karbonatlaşma





**Şekil 4. a.** Hiyalomikrolitik porfirik dokulu bazalt. Topağaç kuzeyi. Serisitleşmiş plajiyoklas, kısmen korunmuş tek yönlü klivajlı piroksen ve hamurdan itibaren kloritleşmeler. Fenokristalen- zonlu plajiyoklas, kısmen korunmuş piroksen ve özşekilsiz opak mineraller, **b.** İntergranüler dokulu bazalt. Kırlangıç kuyruğu dokulu plajiyoklaslar. Kısmen korunmuş küçük piroksenler. Asker Dağı kuzey yamacı, **c.** Subofitik ve intergranüler bazalt. Fahribey Mezrası Kuzeyi. Karlspat ikizli, zonlu ve klivajlı piroksenler, **d.** Subofitik ve intergranüler bazalt. Fahribey kuzeyi. Kırlangıç kuyruğu görünümlü yer yer de zonlu plajiyoklaslar, yer yer epidotlaşmış piroksenler. Pl: plajiyoklas, pir: piroksen, **e.** Amigdaloidal bazalt. Mikrolitik plajiyoklaslar, karbonat dolguları, serisitleşmiş feldspatlar, yer yer zonlu mikrokristalen plajiyoklaslar, **f.** Amigdaloidal bazalt. Soğanlı dolayları. Hamurdan ve bileşenlerden itibaren opaklaşma ve killeşme. Mikrolitik yer yer kırlangıç görünümlü plajiyoklaslar. Epidotlaşmış piroksenler.

## 5. Konfokal Raman Spektrometresi Çalışmaları

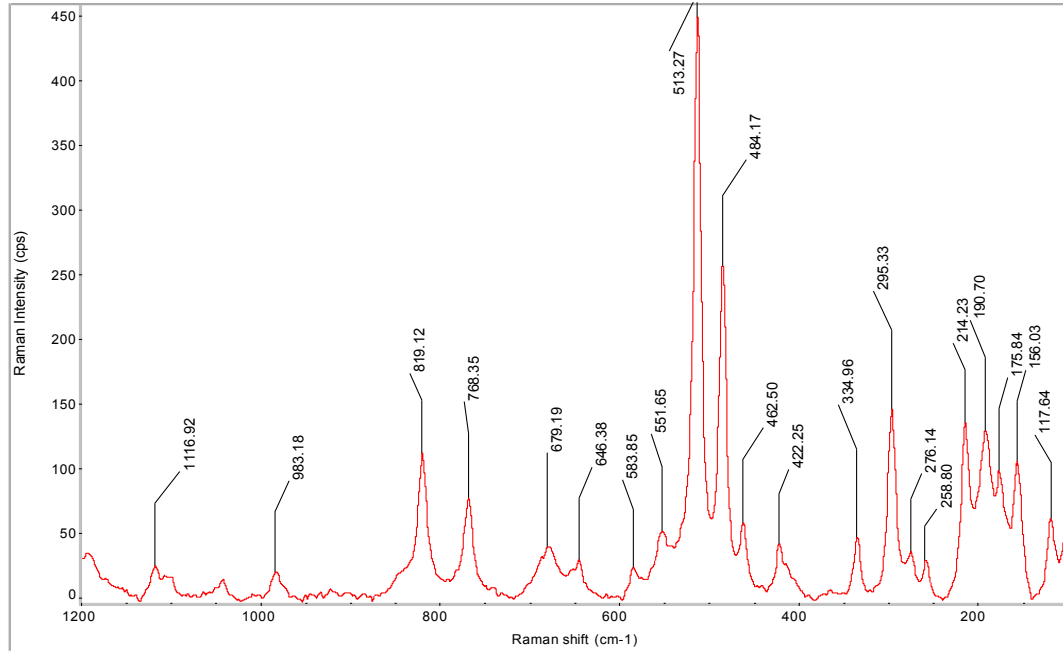
Raman spektroskopisi, tahribatsız, hızlı bir yolla ve mikrometre boyutundan santimetre boyutuna kadar değişen görüş alanlarında (ince kesitte) mineral tanımlaması sağladığı için, özellikle mineraloji-petrografik çalışmalarda kullanım için çok uygun bir yöntem olup, mikrometre çözünürlükteki tek bir ışın altında çok çeşitli mineral fazlarını açığa çıkarabilme ve diğer ışın demeti yöntemlerine göre bireysel mineral fazını tayin etme kabiliyetine sahiptir [36]. Bundan dolayı çalışma alanındaki kayalar üzerinde ilk kez uygulanmıştır (Tablo 2).

**Tablo 2.** Çalışma bölgesindeki mafik volkanik kayaların karşılaştırmalı kaya ve mineralojik özellikleri.

Lokasyon	ASKER DAĞI			FAHRİBEY			SOĞANLI
<b>Kaya Türü</b>	Bazaltik yastık lav	Bazaltik yastık lav	Bazaltik yastık lav	Bazaltik yastık lav	Bazaltik yastık lav	Bazaltik yastık lav	Bazaltik yastık lav
<b>İncelenen Mineral</b>	Piroksen Opak	Piroksen Plajiyoklas	Piroksen	Plajiyoklas	Plajiyoklas Piroksen Opak	Piroksen	Plajiyoklas Piroksen
<b>Saptanan Mineral Türü</b>	Ojit Manyetit	Diyopsit Albit	Ojit	Albit	Labradorit Ojit Manyetit	Ojit	Albit Epidotlaşmış piroksen

### 5.1. Fahribey dolayları

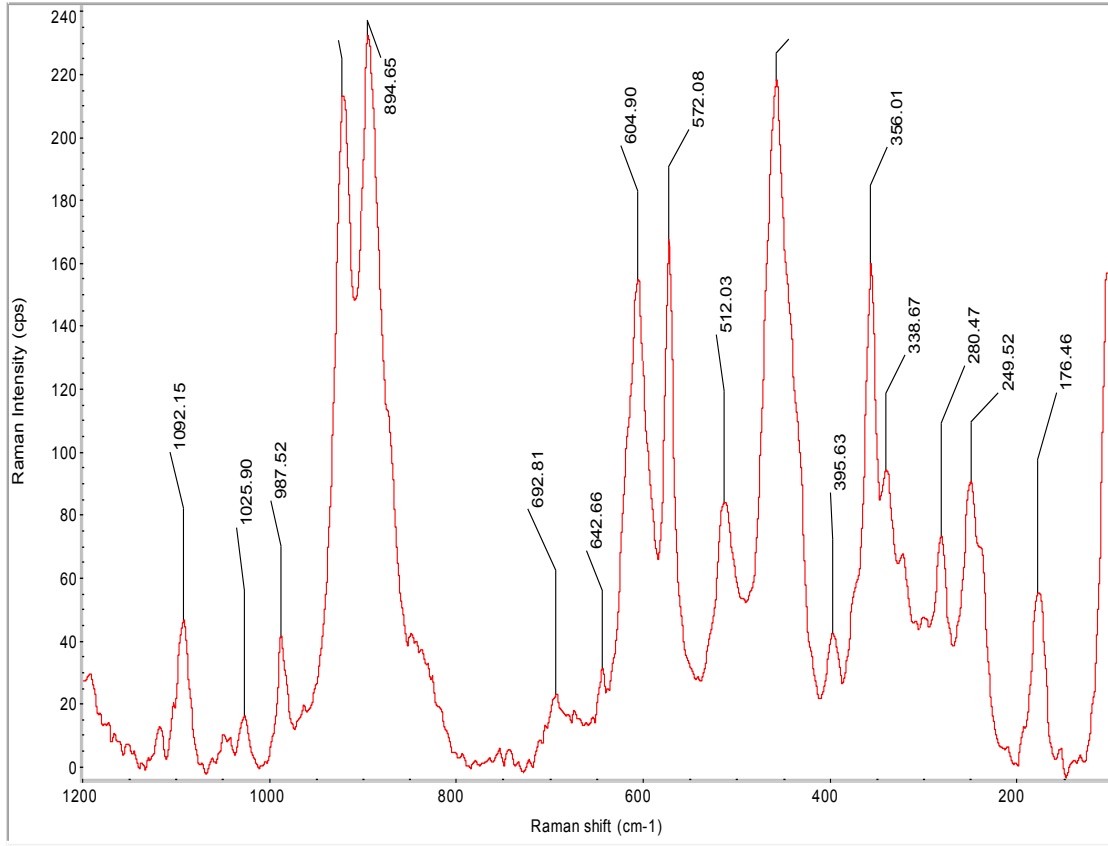
Fahribey mezrası kuzeyinde yüzeyleme veren bazaltik yastık lavlarda plajiyoklas, piroksen ve opak mineral Raman ölçümü gerçekleştirilmiştir. Burada ölçülen plajiyoklas mineraline ait, Raman spektrumu (Şekil 5) ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 117.64, 156.03, 175.84, 190.70, 214.23, 258.80, 276.14, 295.33, 334.96, 422.25, 462.50, 484.17, 513.27, 551.65, 583.85, 646.38, 679.19, 768.35, 819.12, 983.18, 1116.92 (Şekil 5) olarak ortaya çıkmaktadır.  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  bileşimli tektosilikat grubu minerali olan 'albit-labradorit' elde edilen kompozisyonudur. Piroksenden elde edilen ölçüm neticesinde elde edilen Raman pikleri ojittir. Opak mineral ölçümü ise manyetit minerali pikini vermiştir.



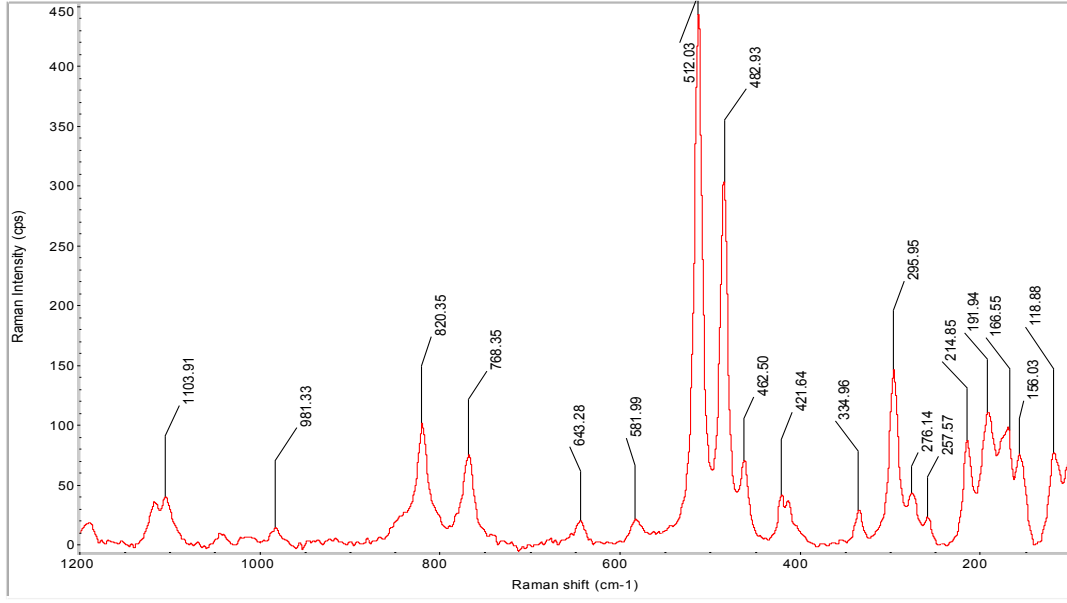
**Şekil 5.** Fahribey mezrası kuzeyindeki bazaltlardaki albit (plajiyoklas) mineralinin Raman pik spektrumu.

## 5.2. Soğanlı Mezrası dolayları

Konfokal Raman Spektrometresi çalışmalarına bağlı olarak, Soğanlı mezrası batısında yüzeyleme veren bazaltik yastık lavlardaki Piroksen mineraline ait Raman spektrumu ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 176.46, 249.52, 280.47, 338.67, 356.01, 395.63, 512.03, 572.08, 604.90, 642.66, 692.81, 894.65, 987.52, 1025.90, 1092.15 (Şekil 6,7) olarak ortaya çıkmaktadır.  $\{Ca_2\}\{Al^2Fe^{3+}\}O(OH)$  bileşimli tektosilikat grubu minerali olan 'epidot' elde edilen kompozisyonudur. Mineral üzerinde alterasyon ya da düşük dereceli metamorfizma izleri gösteren piroksen epidot dönüşümü dolayısıyla piroksen türü tespit edilememiştir. Aynı alandan plajiyoklas mineraline ait Raman spektrumu ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 118.88, 156.03, 166.55, 191.94, 214.85, 257.57, 276.14, 295.95, 334.96, 421.64, 462.50, 482.93, 512.03 (Şekil 6,7) olarak ortaya çıkmaktadır.  $NaAlSi_3O_8$  bileşimli tektosilikat grubu minerali olan 'albit' türü plajiyoklas elde edilen kompozisyonudur.



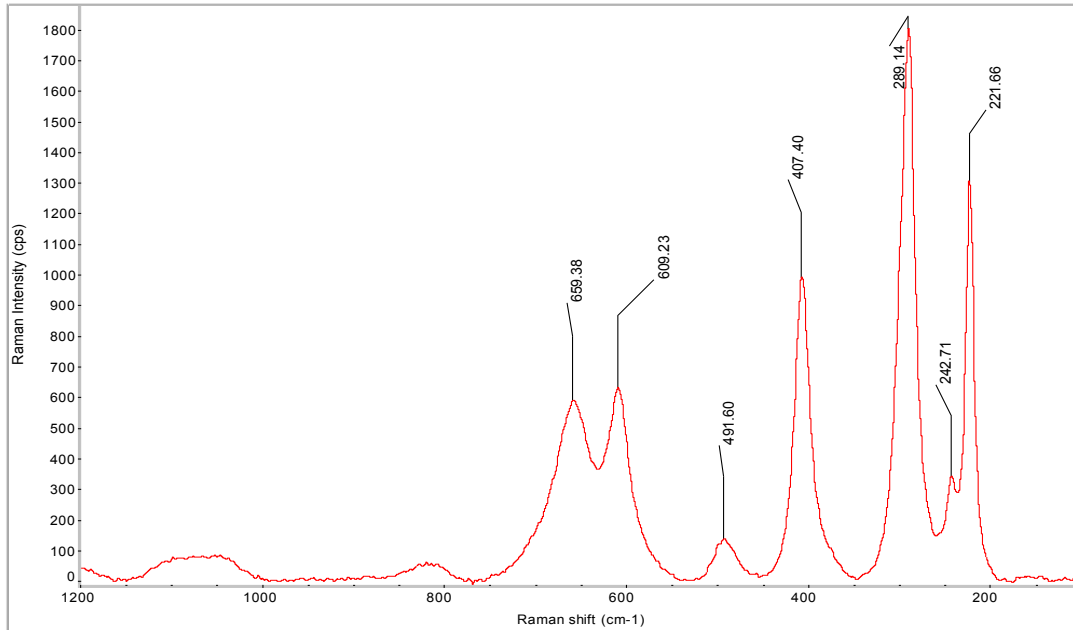
Şekil 6. Soğanlı mezrası batısında yüzeyleme veren bazaltik yastık lavdaki epidot mineralinin Raman pik spektrumu.



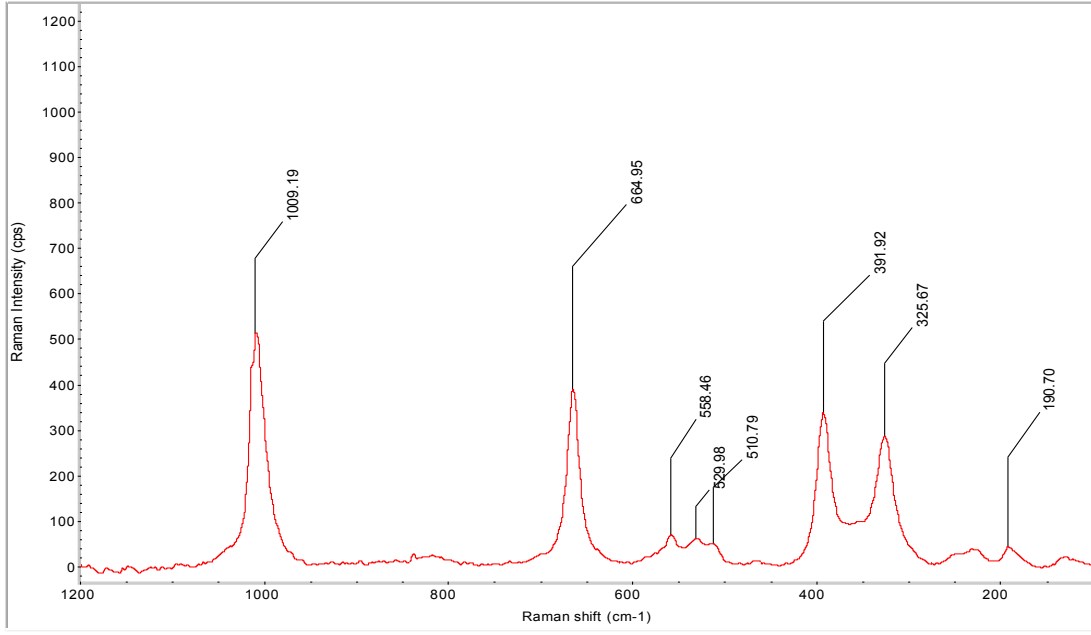
Şekil 7. Soğanlı mezarası batısında yüzeyleme veren bazaltik yastık lavdaki albit (plajiyoklas) mineralinin Raman pik spektrumu.

### 5.3. Asker Dağı dolayları

Bu bölgede 3 örnek üzerinde yapılan (AS-1,2,3 nolu örnekler) Konfokal Raman Spektrometresi çalışmalarına bağlı olarak, Askertepe güney yamaçlarında yüzeyleyen bazaltik yastık lavlardaki Piroksen mineralinden elde edilen Raman spektrumu ölçümleri ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 190.70, 325.65, 391.92, 510.79, 529.98, 558.46, 664.95 (Şekil 8 ve 9) olarak ortaya çıkmaktadır. Ojitik klinopiroksen olduğu tespit edilmiştir. Aynı örnekten opak mineraline ait Raman spektrumu ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 221.66, 242.71, 289.14, 407.40, 491.60, 609.23, 659.38 (Şekil 8 ve 9) olarak ortaya çıkmaktadır. Opak mineral türü hematit olarak ortaya çıkmıştır.

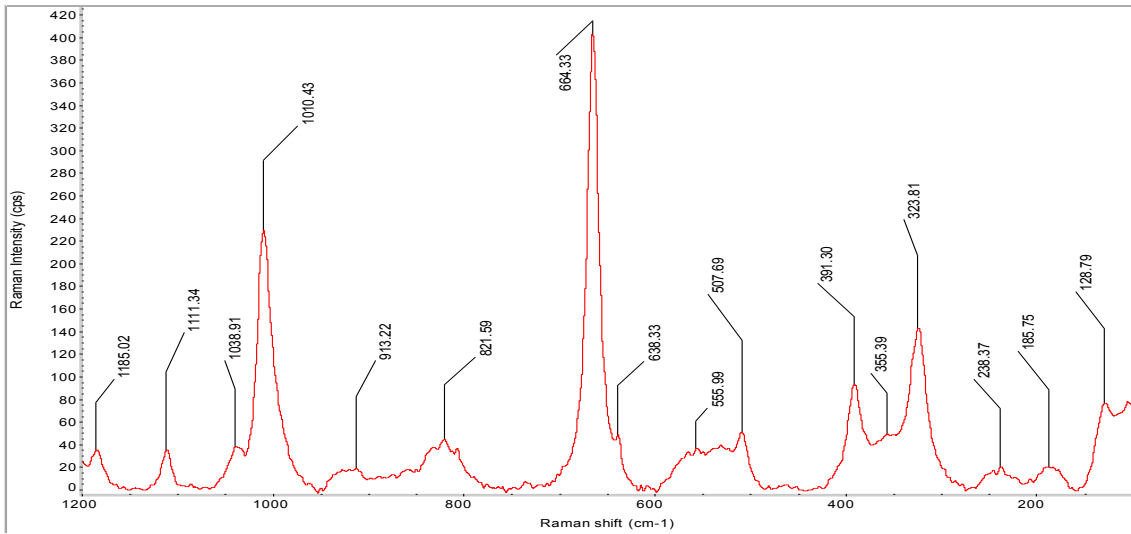


Şekil 8. Asker Dağı güney yamaçlarında yüzeyleyen bazaltik yastık lavdaki ojit (piroksen) mineralinin Raman pik spektrumu.

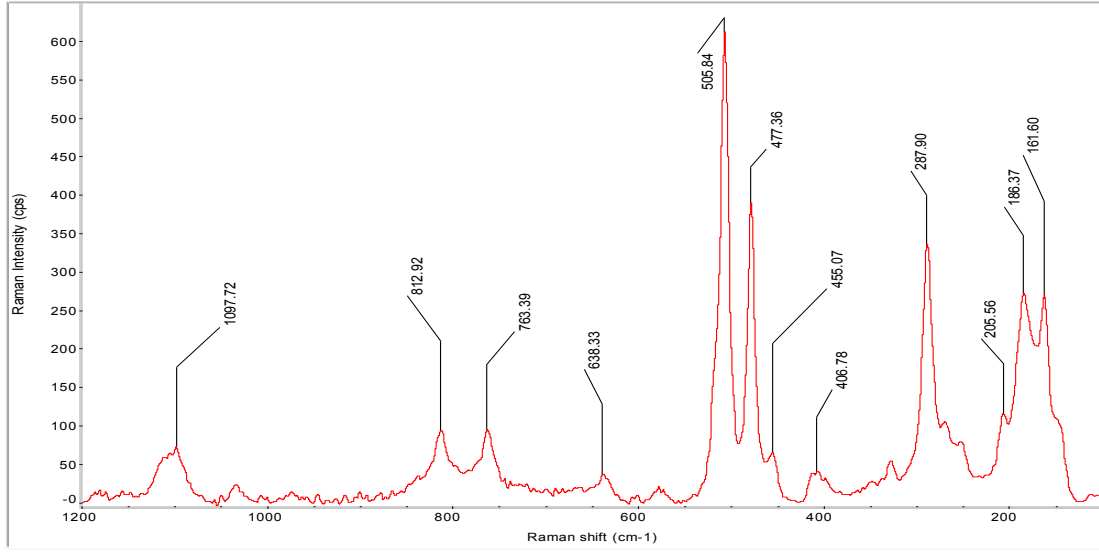


Şekil 9. Asker Dağı güney yamaçlarında yüzeyleyen bazaltik yastık lavdaki hematit (opak) mineralinin Raman pik spektrumu.

Konfokal Raman Spektrometresi çalışmalarına bağlı olarak, Asker Dağı güney yamaçlarında yüzeyleyen bazaltik yastık lavdaki plajiyoklas mineraline ait Raman spektrumu ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 161.60, 186.37, 205.56, 287.90, 406.78, 455.07, 477.36, 505.84, 638.33, 763.39, 812.92, 1097.72 (Şekil 10) olarak ortaya çıkmaktadır. Mineral türü albit olarak ortaya çıkmıştır. Bu kayalardaki piroksen mineraline ait Raman spektrumu ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 128.79, 185.75, 238.37, 323.81, 355.39, 391.30, 507.69, 555.99, 638.33, 664.33, 821.59, 913.22, 1010.43, 1038.91, 1111.34, 1185.02 (Şekil 11) olarak ortaya çıkmaktadır. Diyopsit türü klinopiroksen olduğu tespit edilmiştir. Bu alanda bir başka yastık lav örneği üzerinde gerçekleştirilen Konfokal Raman Spektrometresi çalışmasında piroksen mineralinin Raman spektrumu ile küçükten büyüğe ölçülen pik değerleri 183.27, 324.43, 359.72, 393.77, 507.69, 557.22, 663.71, 1009.19 (Şekil 12) olarak ortaya çıkmaktadır. Ojit türü klinopiroksen olduğu tespit edilmiştir.



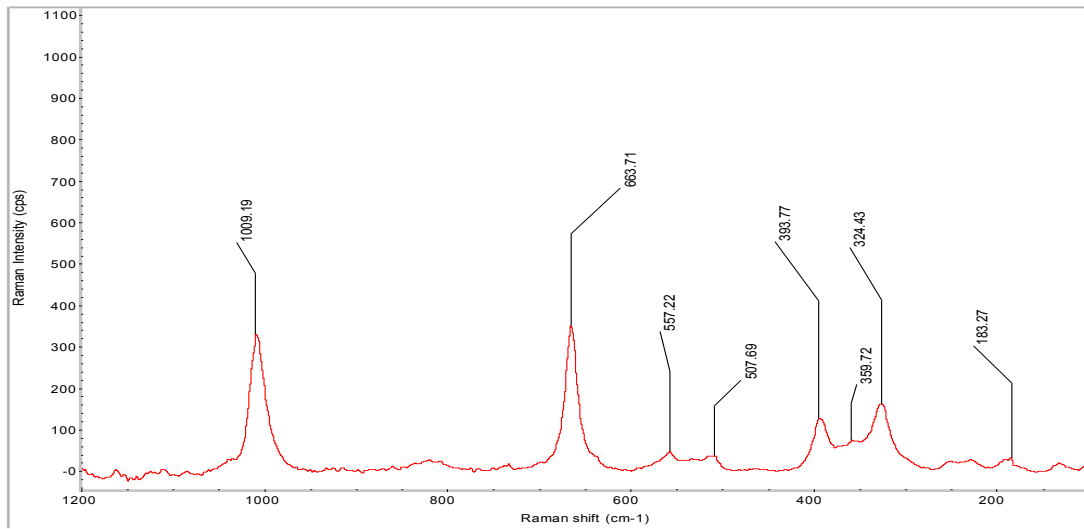
Şekil 10. Asker Dağı güney yamaçlarında yüzeyleyen bazaltik yastık lavdaki diyopsit (piroksen) mineralinin Raman pik spektrumu.



Şekil 11. Asker Dağı güney yamaçlarında yüzeyleyen bazaltik yastık lavdaki albit (plajiyoklas) mineralinin Raman pik spektrumu.

## 6. Sonuçlar

İnceleme bölgesinde gerçekleştirilen Konfokal Raman Spektrometresi çalışmalarında piroksen, plajiyoklas ve bazı opak mineraller üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Fahribey mezrası kuzeyinde yüzeyleme veren bazaltik yastık lavlarda albit-oligoklas türü plajiyoklas, ojitik piroksen ve manyetitler saptanmıştır. Fahribeyköy kuzeyindeki mafik volkaniklerde ojitik piroksenler saptanmıştır. Soğanlı mezrası batısındaki bazaltik yastık lavlarda piroksen minerali üzerinde alterasyon ya da düşük dereceli metamorfizma izleri gösteren epidot dönüşümü dolayısıyla piroksen türü tespit edilememiştir. Bu alanda aynı örnekten elde edilen plajiyoklas mineraline ait Raman piki 'albit' türü plajiyoklas vermiştir. Asker Dağı güney yamaçlarındaki bazaltik yastık lavlardaki piroksenler 'diyopsit-ojit' bileşimli, opak mineraller ise 'hematit' olarak ortaya çıkarken, plajiyoklaslar albit türündedir. Genel olarak çalışılan alanlarda birbirine benzer şekilde ojit, diyopsit türünde klinopiroksenlerin varlığı ile albit-oligoklas türü plajiyoklaslar ve hematit-manyetit türünde opak minerallerin varlığı saptanmıştır.



Şekil 12. Asker Dağı güney yamaçlarında yüzeyleyen bazaltik yastık lavdaki ojit (piroksen) mineralinin Raman pik spektrumu.

## Teşekkür

Bu çalışma FÜBAP MF-20.07 nolu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma MEÇ'nin YL tezinden türetilmiş olup, MEÇ ve MU eşit oranda fikir sahibidirler aynı zamanda, analiz, yorumlama, yazma bölümlerinin hepsinde her ikisinin de eşit oranda katkıları bulunmaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Göncüoğlu MC. Introduction to the geology of Turkey: Geodynamic evolution of the pre-Alpine and Alpine terranes. MTA Monography Series 2010; 5: 1-66.
- [2] Perinçek D. Palu–Karabegan–Elazığ–Sivrice–Malatya alanının jeolojisi ve petrol imkanları, TPAO. Rapor no: 1361, Ankara, 1979a.
- [3] Perinçek D. The geology of Hazro-Karudag-Çüngüs-Maden-Ergani-Hazar-Elazığ- Malatya area. Guide Book TJK Yayını, 33s, Ankara, 1979b.
- [4] Naz H. Elazığ-Palu dolayının jeolojisi. TPAO rapor, 1360s; 1979.
- [5] Herece E, Akay E, Küçümen Ö, Sariaslan M. Elazığ-Sivrice-Palu dolayının jeolojisi, M.T.A. Raporu, No: 9634s, 1992.
- [6] Bingöl AF. Elazığ–Pertek–Kovancılar arası volkanik kayaların petrografik ve petrolojik incelenmesi: F.Ü. Fen Fak. Dergisi, 1982; 1, 9–21.
- [7] Bingöl AF. Geology of Elazığ area in the Eastern Taurus region: In Tekeli, O. And Göncüoğlu, M.C., eds., “ Geology of the Taurus Belt” int. Symp., Proceedings, 1984; 209–216.
- [8] Bingöl AF. Petrographical and petrological features of intrusive rocks of Yüksekova Complex in the Elazığ region (Eastern Taurus–Turkey). Journal of Firat University 1988; 3(2), 1-17.
- [9] Türkmen İ. Stratigraphy and sedimentology of the Çaybağı Formation (Upper Miocene–Pliocene) to the east of Elazığ. Geological Bulletin of Turkey 1991; 34(1): 45–53.
- [10] Çetindağ B. Elazığ, Palu-Kovancılar dolayının hidrojeoloji incelenmesi: Yüksek lisans tezi (yayınlanmamış), F.Ü. Fen Bil. Enst., Elazığ, 1985.
- [11] Turan M, Bingöl AF. Kovancılar-Baskil (Elazığ) arası bölgenin tektonostratigrafik özellikleri., Ed. Yetiş, C., Ahmet Acar Jeoloji Sempozyumu; 1991; Çukurova Üniv., Adana, 193-204.
- [12] Çelik H. Kovancılar (Elazığ) yakın kuzey ve batısındaki alanın jeolojik özellikleri, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1994.
- [13] Çelik H. The effects of linear coarse-grained slope channel bodies on the orientations of fold developments: a case study from the Middle Eocene-Lower Oligocene Kırkgeçit Formation, Elazığ, eastern Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences 2013; 22(2): 320-338.
- [14] Kürüm S, Taşkın AH. Elazığ Yakın Kuzeyindeki Magmatitlerin Petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri. Geosound 2000; 36 (1): 53-64.
- [15] Kürüm S, Altunbey M. Şavak-Ayazpınar (Pertek/Tunceli) köyleri arasındaki magmatik kayaların petrografik ve jeokimyasal özellikleri. Geosound 2001; 85-108.
- [16] Akkoca DB. Çaybağı (Elazığ) killerin mineralojisi, jeokimyası ve ekonomik değerlendirme olanakları, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2001.
- [17] Dönmez C. Soğanlı-Uyandı (Elazığ) arasında yüzeyleyen Elazığ Magmatitleri'nin jeolojisi, petrografisi ve jeokimyası, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana., 2006.
- [18] Ural M. Elazığ ve Malatya çevresindeki Yüksekova Karmaşığı bazik volkanitlerinin petrokimyası, petrolojisi ve yaşı, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 2012.
- [19] Ural M, Arslan M, Göncüoğlu MC, Tekin UK, Kürüm S. Late Cretaceous arc and back-arc formation within the Southern Neotethys: whole-rock, trace element and Sr-Nd-Pb isotopic data from basaltic rocks of the Yüksekova Complex (Malatya-Elazığ, SE Turkey), Ofioliti 2015; 40(1).
- [20] Akkoca DB, Yıldırım I, Ertürk MA. First data on the geochemistry of fluvial deposits of Çaybağı and Palu formations (Eastern Elazığ, Turkey). Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 24(3): 527-537.
- [21] Beyarslan M, Bingöl AF. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin and tectonic implications of late cretaceous intra-oceanic arc magmatites in the Southeast Anatolian Orogenic Belt (SE-Turkey). Journal of African Earth Sciences 2018; 147, 477-497.
- [22] Sar A, Ertürk MA, Rizeli ME. Genesis of Late Cretaceous intra-oceanic arc intrusions in the Pertek area of Tunceli Province, eastern Turkey, and implications for the geodynamic evolution of the southern Neo-Tethys: Results of zircon U–Pb geochronology and geochemical and Sr–Nd isotopic analyses. Lithos 2019; 350, 105263.
- [23] Ural M, Kaya-Sarı M. Paleogeographic and Age Findings on Planktonic Foraminiferal Assemblages of Yüksekova Complex in the Northeast of Elazığ (Eastern Turkey), The World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS, 9-13 September), Proceedings, Prague, Czech Republic, 2019.
- [24] Ural M, Sayit K, Koralay OE, Goncuoglu MC. Geochemistry and Zircon U-Pb Dates of Felsic-Intermediate Members of the Late Cretaceous Yüksekova Arc Basin: Constraints on the Evolution of the Bitlis–Zagros Branch of Neotethys (Elazığ, E Turkey), Acta Geologica Sinica-English Edition 2021; 95(4): 1199-1216.

- [25] Ural M, Aktaş MA. Yüksekova Yay Karmaşığında yastık lavların oluşumu ve kökenine dair yeni kantitatif bulgular, Elazığ (Doğu Türkiye). Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi 2023; 38(1): 535-546.
- [26] Kaygılı S, Aksoy E. Kovancılar (Elazığ-Türkiye) jeositi: Nummulites'li seviyeler ve antiklinal. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2017; 29 (1): 295-301.
- [27] Kaygılı S. Reassessment of the age and depositional environment of the Kırkgeçit Formation based on larger benthic foraminifera, NW Elazığ, Eastern Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences 2021; 30, 580-600.
- [28] Kaygılı S. Kırkgeçit Formasyonu'nun Bartoniyen-Priyaboniyen iri bentik foraminifer topluluğu ve ortamsal yorumu, Elazığ, Türkiye. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 34 (1): 313-339.
- [29] Kerey E, Türkmen İ. Palu Formasyonu'nun (Pliyosen-Kuvaterner) Sedimantolojik Özellikleri (Elazığ Doğusu), Türkiye Jeoloji Bülteni 1991; 34: 21-26
- [30] Koç-Taşgın C, Türkmen İ. Analysis of soft sediment deformation structures in Neogene fluvio-lacustrine deposits of Çaybağı formation, Eastern Turkey. Sedimentary Geology 2009; 218: 16–30.
- [31] Ural M, Göncüoğlu MC, Arslan M, Tekin UK, Kürüm S. Petrological and paleontological evidence for generation of the Arc Back Arc system within the closing Southern Branch of Neotethys during Late Cretaceous. Proceedings XX Congress of the Carpathian-Balkan Geological Association, 24 - 26 Eylül 2014.
- [32] Ural M, Sayit K, Tekin UK. Whole-Rock And Nd-Pb Isotope Geochemistry And Radiolarian Ages Of The Volcanics From the Yüksekova Complex (Maden Area, Elazığ, E Turkey): Implications for a Late Cretaceous (Santonian-Campanian) Back-Arc Basin In The Southern Neotethys. Ofioliti 2022; 47(1).
- [33] Türkmen İ. Palu-Çaybağı (Elazığ doğusu) yöresinin sedimantolojik incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enst., 1988.
- [34] Pişkin Ö. Çelikhan doğusu lökokuvarsmonzonitleri üzerine petrokimya ve jeokronoloji verileri (Adıyaman-Türkiye), TJK. Bülteni 1978; 21: 107-111.
- [35] Yazgan E. A Geotraverse between the Arabian platform and the Munzur nappes, International Symp, On the geology of the Taurus Belt, 1983, Guide book for Excursion V, 1-17, Ankara.
- [36] Fries M, Steele A. Raman Spectroscopy and Confocal Raman Imaging in Mineralogy and Petrography. In: Dieing T., Hollricher O., Toporski J. (eds) Confocal Raman Microscopy. Springer Series in Optical Sciences, vol 158. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.



## AA7475-T7351 ve AA2219-T851 Alaşımlarının Frezelenmesinde Kesici Takım Kaplamalarının ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Simge GENÇALP İRİZALP<sup>1\*</sup>, Handenur KARAOĞLU<sup>2</sup>, Yiğit ERÇAYHAN<sup>3</sup>, Selda AKGÜN KAYRAL<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye

<sup>3</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İzmir Ekonomi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

<sup>4</sup> Makina Mühendisliği, Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye

\*simge.gencalp@cbu.edu.tr, <sup>2</sup>handenurkaraoglu555@hotmail.com, <sup>3</sup>yigit.ercayhan@ieu.edu.tr, <sup>4</sup>selda.akgun@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 20/07/2023;

Kabul/Accepted: 09/12/2023)

**Öz:** Bu çalışmada AA 2219-T851 ve AA 7475-T7351 alaşımlarının frezelenmesinde kesme hızı (500, 600, 700m/dk), ilerleme miktarı (0,1 ve 0,15 mm/diş) ve talaş derinliği (1 ve 8 mm) değişkenleri kullanılmış ve kaplamasız tungsten karbür (WC) kesici uç ve zirkonyum nitrür (ZrN) kaplamalı kesici uç kullanılarak kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlarda en ideal yüzey kalitesinin elde edildiği kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kesici uç belirlenmiştir. Sonuç olarak, iki farklı mekanik dayanıma sahip alüminyum alaşımının yüzey sonuçları karşılaştırılıp optimum işleme değerleri bulunmuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü 700 mm/dk kesme hızı, 0,1 mm/diş ve 1 mm ilerleme miktarı parametrelerinde elde edilmiş ve ilerleme hızı arttıkça yüzey kalitesinin artmasının yanında ZrN kaplamalı kesici uç kullanılması ile daha iyi yüzey özelliklerine ulaşılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** AA7475-T7351, AA2219-T851, Frezeleme, Kesme Parametreleri, Yüzey Pürüzlülüğü

### Experimental Investigation of the Effect on Surface Roughness of Cutting Tool Coating and Cutting Parameters on CNC Milling of AA7475-T7351 and AA2219-T7351 Alloys

**Abstract:** In this study, cutting speed (500, 600, 700 m/min), feed (0.1 and 0.15 mm/tooth), and depth of cut (1 and 8 mm) were used as parameters in the machining of AA2219-T851 and AA7475-T7351 alloys, and the effects of cutting parameters on surface roughness were investigated by using uncoated WC cutting tool and ZrN coated cutting tool. The surface roughness of the machined surfaces was investigated by surface profilometer. As a result of the machining operations, the cutting speed, feed, depth of cut, and cutting tool were determined at which the optimum surface quality was obtained. As a result, the surface results of two aluminum alloys that have different strengths were compared, and optimum machining parameters were found. The lowest surface roughness was obtained at 700 mm/min cutting speed, 0.1 mm/tooth, and 1 mm feed parameters, and as the feed rate increased, the surface quality increased and better surface properties were achieved by using ZrN-coated cutting tool.

**Keywords:** AA7475-T7351, AA2219-T851, Milling, Cutting Parameters, Surface Roughness

#### 1. Giriş

Günümüzde alüminyum alaşımları hafif ve korozyona karşı dirençli olmaları gibi üstün özellikleri sebebiyle otomobil, uzay, havacılık ve savunma sanayisinde kullanılmakta olup gün geçtikçe kullanım alanları artmaktadır [1]. Alüminyum yüksek dayanım özelliğiyle birlikte iyi ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Alüminyum saf halde iken bazı mekanik özellikleri düşük değerdedir ancak alaşım durumunda bu özellikler iyileştirilir. Hem döküm hem dövme endüstrisinde pek çok ürün grubuna hitap eden malzeme kategorisindedir [2]. Bu sebeple farklı ürünler için gerek nihai şekil gerekse bitiş işlemi için talaşlı işleme ihtiyacı duyulmaktadır.

Alüminyum sünek bir malzemedir ve talaşlı işleme esnasında çelik malzemelere göre farklı davranışlar sergilemektedir. Alüminyum alaşımları üretim esnasında sıvanma davranışı göstererek ve kesici takımların üzerine yapışarak işleme parametrelerini olumsuz etkilemektedirler. Hassas boyut ve yüzey gereksinimi olan endüstrilerde hafifliği nedeniyle çok tercih edilen alüminyum alaşımlarının işlenmesi sırasında parametrelerin dikkatli seçilmesi oldukça önem arz etmektedir [3].

Kesici takımdan veya üretim sürecindeki diğer problemlerden kaynaklanan yüzey düzensizlikleri pürüzlülük olarak tanımlanır [4]. Pürüzlülük çapraz ilerleme izleri ile diğer düzensizlikleri kapsar. Üretim sonucunda parça üzerinde istenen/hedeflenen belirli bir pürüzlülük değeri vardır; parçanın kullanıldığı yere göre bu değer değişiklik göstermektedir. Talaşlı işlemede amaç parçaları istenilen geometri, boyut ve yüzey bakımından belirli bir doğruluk

\* Sorumlu yazar: [simge.gencalp@cbu.edu.tr](mailto:simge.gencalp@cbu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-0339-5699, <sup>2</sup> 0009-0008-0272-6012, <sup>3</sup> 0000-0002-1213-1572, <sup>4</sup> 0000-0003-1971-1550

dercesine göre üretmektir. YüzeY kalitesi; yüzeYin düzgünlüğü, ölçü tamlığı ve geometrik doğruluk olarak değerlendirilir. Parçaların düzgünlüğünü, doğruluğunu kapsayan yüzeY kalitesi, talaş kaldırma işleminin belirlenmesini yönlendiren en önemli özelliğidir [5]. Talaşlı işleme yapılırken parçaların yüzeY kalitesini etkileyen birçok faktör vardır. İşlenecek olan parçanın türü, kesme hızı, ilerleme hızı, kesici takım türü, talaş derinliği ve soğutma sıvısının kullanımı gibi faktörler dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Parametreler seçilirken kullanılacak malzemeye bağlı olarak kesici takım seçilmeli ve ona uygun standartlaştırılmış değer aralıklarında kesme parametreleri belirlenmelidir.

Dişbudak [2] tarafından yapılan çalışmada AA7075 alaşımının sırasıyla üniversal torna ve freze tezgâhında kaplamasız karbür kesici takımlarla işlenmesinde ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliğinin yüzeY pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlerleme miktarı ve talaş derinliği arttıkça yüzeY pürüzlülüğünün arttığı, kesme hızının artmasıyla azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. YüzeY pürüzlülüğünde etkili faktörlerin sırasıyla ilerleme miktarı, kesme hızı ve talaş derinliğinin olduğu görülmüştür. Pul [3] tarafından yapılan çalışmada AA7075, AA6061 ve AA2024 alaşımlarının talaşlı işlenmesinde yüzeY pürüzlülük değeri ve kesici takım aşınma davranışları incelenmiş üç farklı alüminyum alaşımı arasında sonuçlar karşılaştırılıp optimum değerlerin bulunması amaçlanmıştır. Çalışmalarda sementit karbür uç kullanılmıştır. Sonuç olarak ilerleme miktarındaki küçük artışlara bağlı olarak yüzeY pürüzlülük değerlerinde büyük artışlar meydana gelmiştir. Yontar [6], yaptığı çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliklerin işlenmesinde, en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesini amaçlamıştır. Parçalar farklı ilerlemeler, kesme hızları ve talaş derinliklerinde soğutma sıvısı kullanılmadan işlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda sabit talaş derinliği ve ilerleme değerleri için; kesme hızının artan değerlerinde kesme kuvvetlerinin azaldığı; sabit talaş ve kesme hızı değerlerinde ilerlemenin artmasıyla kesme kuvvetlerinin de arttığı, sabit kesme hızı ve ilerleme değeri için; talaş derinliğinin artan değerlerinde kesme kuvvetlerinin de arttığını bulmuşlardır. İlerleme hızının yüzeY pürüzlülük değerine oldukça önemli bir seviyede etki ettiği görülmüştür. Kesme hızının artması ile yüzeY pürüzlülüğünün azaldığı bunun sebebi olarak da yüksek hızlarda artan sıcaklıktan kaynaklandığı yazarlar tarafından öngörülmüştür.

Bu çalışmada, CNC freze tezgâhında AA7475-T7351 ve AA2219-T851 alaşımlarının talaşlı olarak işlenmesinde kesme parametrelerinin ve farklı kesici takımların yüzeY pürüzlülüğüne olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada materyal seçimi literatürdeki boşluğu doldurmak amacıyla yapılmıştır. Literatürde, bu alüminyum alaşımları için işlenebilirlik, yüzeY kalitesi ve parametrelerin etkisi hakkında yeterli çalışma olmadığı görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda en iyi yüzeY kalitesinin elde edildiği kesme hızı, ilerleme miktarı, talaş derinliği ve kullanılan takım belirlenmiştir. Özellikle ZrN takım ile söz konusu iki alaşımın işlenmesi hakkında az çalışma olması ve özellikle AA2219-T851' in talaşlı işlenmesinin girdi parametreleriyle ilişkilendirildiği az sayıda çalışma olması bu çalışmanın ileride yapılacak olan araştırmalara fayda sağlaması amaçlanmıştır.

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. İş parçası

Bu çalışmada kullanılan AA7475-T7351 ve AA2219-T851 alaşımlarının kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir. AA7475-T7351 korozyona karşı dirençlidir ve zorlu çevre koşulları uygulamalarında en çok uçak tasarımında tercih edilmektedir. AA2219-T851 ise iyi kaynaklanabilir ve korozyona karşı dirençli bir malzemedir. Havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır. Deneylerde iş parçası olarak 350x350x40 mm boyutlarına sahip prizmatik alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Talaşlı işleme deneylerinden önce numunelerin Rockwell B yöntemi ile sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve sırasıyla, AA7475-T7351 için 77 HRB ve AA2219-T851 için 68,8 HRB değerlerinde bulunmuştur.

**Tablo 1.** AA7475-T7351 ve AA2219-T851 alaşımlarının kimyasal kompozisyonları

*	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Cr	Diğer El.	Al
AA7475	1,20-1,90	0,12 maks.	1,90-2,60	0,06 maks.	0,10 maks.	0,06 maks.	5,20-6,20	0,18-0,25	<0,05	Kalan
AA2219	5,80-6,80	0,30 maks.	0,02 maks.	0,20-0,40	0,20 maks.	0,02-0,10	0,10 maks.	-	Ti+Zr 0,10-0,25	Kalan

## 2.2. Kesici takım

Tablo 2’de kesici takımların özellikleri verilmiştir. Alüminyum alaşımlarının frezelenmesinde kullanılan 16 mm çapında, 3 ağızlı alüminyum işlemeye uygun WC uç ve magnetron püskürtmeli PVD tekniği ile WC üzerine ZrN kaplamalı ucun görüntüleri Şekil 1’ de verilmiştir. ZrN kaplama film kalınlığı yaklaşık 1,5  $\mu\text{m}$ ’ dir. İki freze ucu için de aynı boylara sahip 70 mm uzunluğunda takım tutucular kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Kesici takımların özellikleri

Kesici uç	Şaft çapı	Takım çapı	Takım boyu	Helis boyu
WC uç	$\phi 16$ mm	$\phi 16$ mm	89 mm	35 mm
ZrN kaplamalı uç	$\phi 16$ mm	$\phi 16$ mm	92 mm	32 mm

## 2.3. Deneysel yöntem

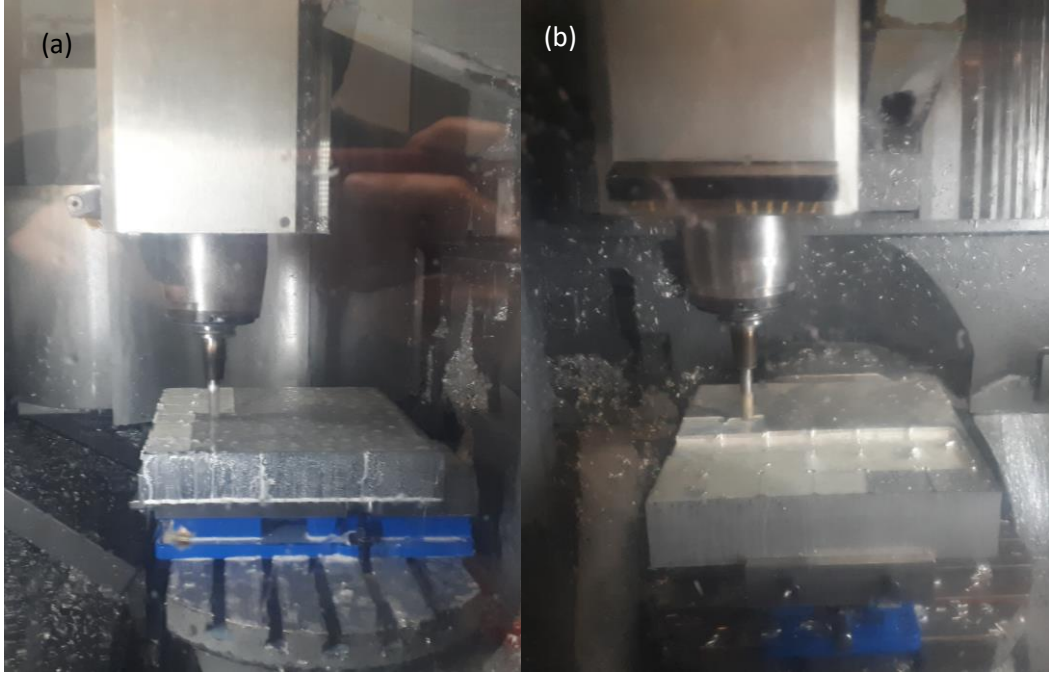
AA7475-T7351 ve AA2219-T851 malzemelerine frezeleme işlemi gerçekleştirmek için Tablo 3’de listelenen işleme parametreleri kesme hızı, talaş derinliği, ilerleme miktarı ve iki farklı kesici takım olarak tartışılmıştır. Malzemeleri işlerken minimum yüzey pürüzlülüğü sağlayan parametrik kombinasyonu belirlemek için Tablo 3’deki seviyelerden faydalanılmıştır. Faktörlerin seviyeleri ön denemeler esnasında talaşlı işlem kesme bölgesinde minimum sıcaklık artışı oluşturan değerlerden referansla seçilmiştir ve işleme operasyonlarında soğutma sıvısı kullanılmıştır. Her bir parametredeki etkiyi görebilmek için her bir parametre setinden 24, iki alaşım için toplam 48 adet talaşlı işlem operasyonu yapılmıştır. Frezeleme deneyleri esnasında alınan örnek görüntü Şekil 2’ de verilmiştir.

**Tablo 3.** Deneylerde kullanılan parametreler

Kesme Hızı (m/dk)	Talaş Derinliği (mm)	İlerleme miktarı (mm/diş)	Kesici Takım (malzeme)
500	1	0,1	WC
600	8	0,15	ZrN Kaplamalı
700			

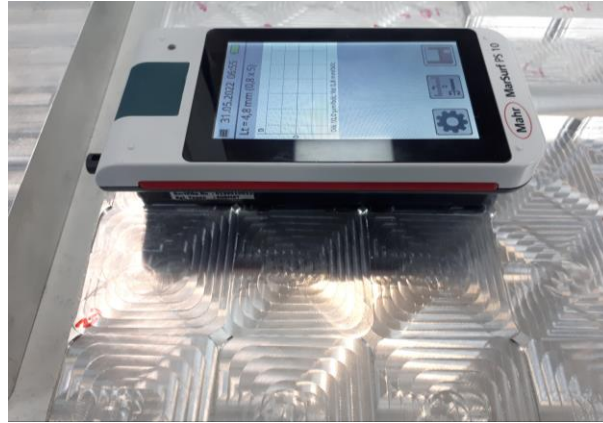


**Şekil 1.** Kesici freze uçları



Şekil 2. Bu çalışmada uygulanan frezeleme operasyonu (a) 1 mm talaş derinliği, (b) 8 mm talaş derinliği

Parçalara alın frezeleme yapılarak yüzey işlenmeye hazır hale getirilmiştir ve parçalar işlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri her bir parametre bölgesinden toplam 5 değer alınarak ortalama  $R_a$  ve  $R_z$  değerleri tablo ve grafiklerle verilmiştir. Yüzey pürüzlülükleri Mahr MarSur PS10 cihazı kullanılarak mekanik profilometre ile gerçekleştirilmiştir. Çizgisel ölçüm yapan, iğne büyüklüğü 2  $\mu\text{m}$  olan bir proba sahip cihaz ile numunelerin yüzeyinde detaylı olarak tarama gerçekleştirilmiş ve ölçümler tamamlanmıştır. Değerlendirme uzunluğu 12,5 mm' ye kadar çıkabilen bu cihazda, deneysel çalışmalarda 4,8 mm olarak belirlenmiştir. Örnek ölçüm görüntüsü Şekil 3' de sunulmuştur.

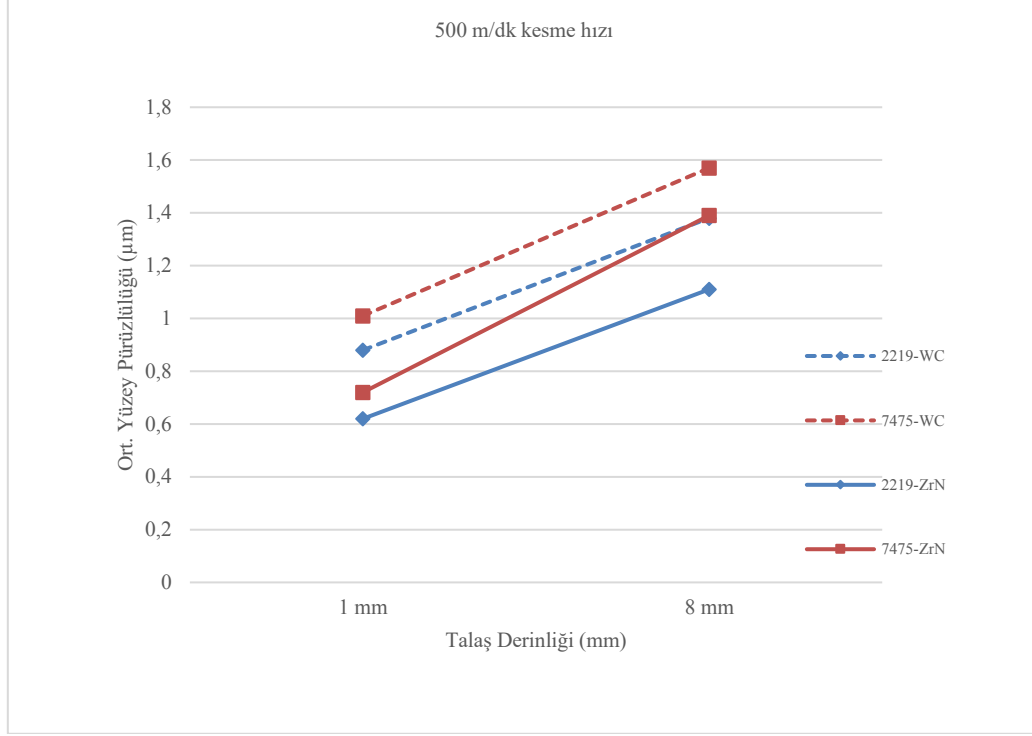


Şekil 3. Talaşlı işlenmiş parça üzerinden yüzey pürüzlülük ölçümü

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada 1 ve 8 mm olmak üzere iki farklı kesme derinliğinde talaş kaldırılmıştır. Talaş derinliği malzemelerin işlenmesinde yüzey kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Üretimde ilerleme hızı gibi diğer parametrelere de uygun olduğu sürece talaş derinliğinin yüksek tutulması tercih edilmektedir bu şekilde aynı zamanda imalat işlemlerinin verimliliği artar [2]. Literatürdeki çalışmaların sonuçları incelendiğinde talaş

derinliğinin artmasıyla numunelerin yüzeyinde olumsuz bir etki olduğu görülür [7]. Talaş derinliğinin etkisi Şekil 4'deki grafikte verilmiştir.



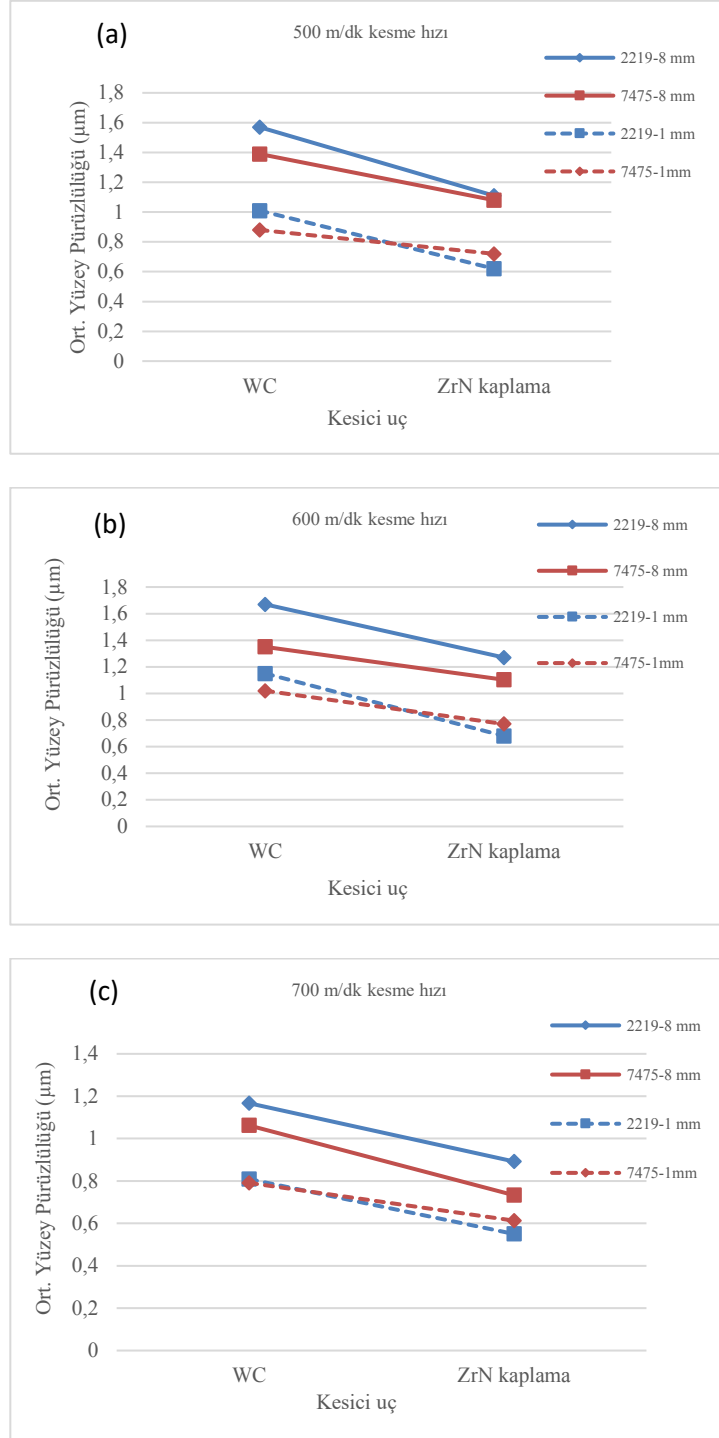
Şekil 4. Talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 4'de görüldüğü gibi talaş derinliği yüzey pürüzlülüğünü etkiler [8]. Talaş derinliği arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü hem AA7475 ve hem AA2219 alaşımı için artmıştır. Çetin vd. [9]' ne göre talaş derinliğinin yüzey üzerindeki bu etkisi kesici takımında meydana gelen plastik deformasyondur. Talaş derinliğiyle beraber talaş kesit alanında da büyüme olacağı için numune işlenirken kesici takım daha fazla sıcaklık ve basınç etkisi altında kalır. Sıcaklık ve basınç etkisiyle kesici takımdaki deformasyon artacağı için yüzey kalitesi de bu durumdan olumsuz etkilenir.

Deneyde her iki malzeme de aynı koşullarda WC uç ve ZrN kaplamalı uç kullanılarak işlenmiştir. Karşılaştırmalı yüzey durumlarını veren grafikler Şekil 5'de sunulmuştur. ZrN kaplamalı ucun kaplamasız uca kıyasla her iki alaşımda ve farklı kesme hızlarında daha iyi yüzey durumu yarattığı elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçlarına bağlı olarak görülmektedir. Kaplamasız WC takım malzemesinin sertlik değeri 1950 HV0.05, ZrN kaplı takımın sertlik değeri ise 2450 HV0.05'dir.

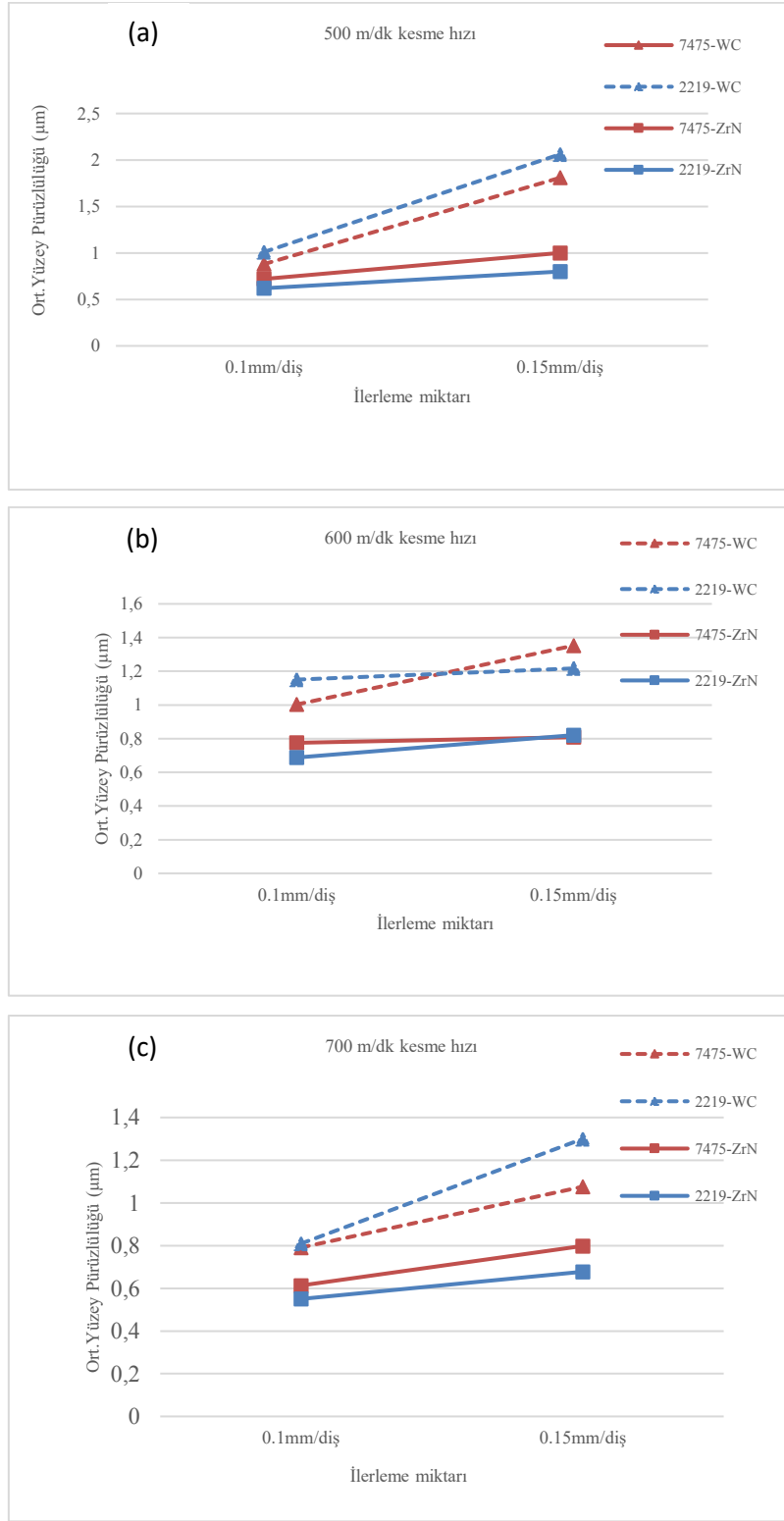
Yüzey pürüzlülük değerleri AA2219 malzeme yüzeyinde kaplamasız WC takımı için 1 mm talaş derinliği operasyonunda ortalama 0,989 µm, ZrN kaplı takım için 0,616 µm olarak, 8 mm talaş derinliği operasyonunda ise ortalama değerler sırasıyla WC takım için 1,26 µm ve ZrN kaplamalı takım için 1,075 µm olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri AA7475 malzeme yüzeyinde kaplamasız WC takımı için 1 mm talaş derinliği operasyonunda ortalama 0,897 µm, ZrN kaplı takım için 0,676 µm olarak, 8 mm talaş derinliği operasyonunda ise sırasıyla ZrN kaplı takım için 1,471 µm ve WC takım için 1,091 µm olarak bulunmuştur. Bu noktada elde edilen sonuçlar ZrN kaplamalı takımın iş parçası üzerinde kaplamasız WC takıma göre daha iyi bir yüzey kalitesi sağladığını göstermiştir. Daha sert takım ile daha iyi nihai yüzey durumu elde etmek mümkündür. Kesici uçlar iki alaşımda da benzer trendlere sahip sonuçlar yaratmıştır.

AA7475-T7351 ve AA2219-T851 Alaşımının Frezelenmesinde Kesici Takım Kaplamalarının ve Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

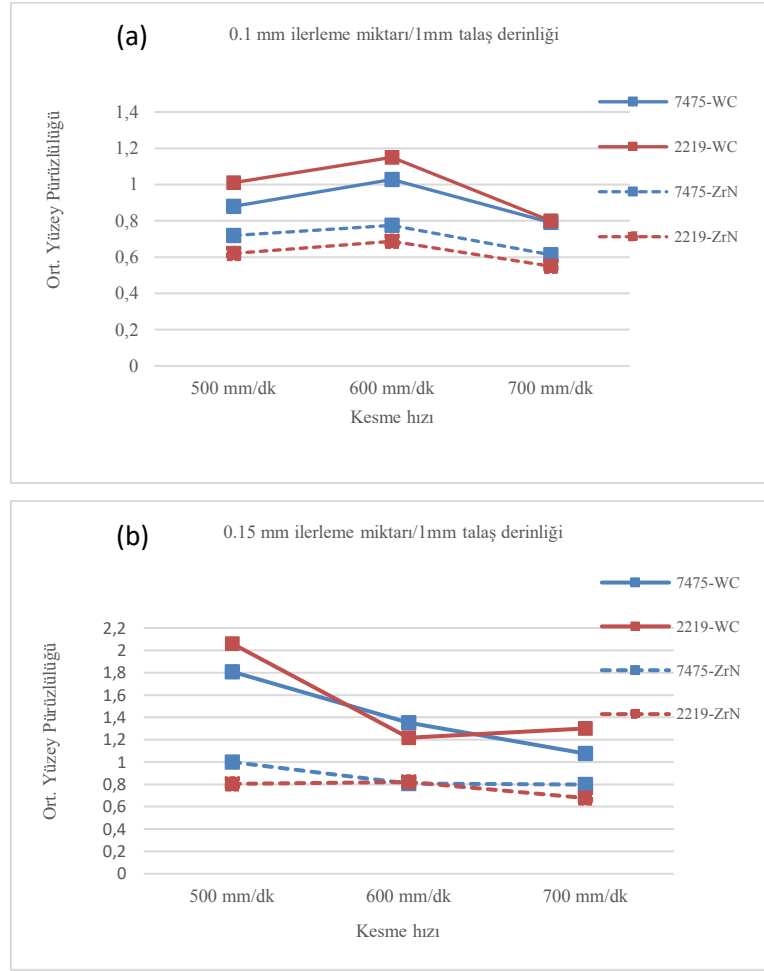


Şekil 5. Kesici ucun yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a) 500 m/dk kesme hızı, (b) 600 m/dk kesme hızı, (c) 700 m/dk kesme hızı

Yapılan deneyler, ilerleme hızının artmasına bağlı yüzey kalitesi olumsuz olarak etkilendiğini göstermiştir. İlerleme miktarının etkisi Şekil 6' da, kesme hızının etkisi ise Şekil 7'deki grafiklerde verilmiştir. Kesme hızında lineer bir etki bulunmamıştır.



Şekil 6. İlerleme miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a) 500 m/dk kesme hızı, (b) 600 m/dk kesme hızı, (c) 700 m/dk kesme hızı



Şekil 7. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a) 0,1 mm ilerleme miktarı/1mm talaş derinliği, (b) 0,15 mm ilerleme miktarı/1mm talaş derinliği

Gökkaya vd. [10] AISI 1030 çeliği üzerine yaptıkları çalışmada benzer şekilde yüzey pürüzlülüğü ile ilerleme miktarında doğru orantılı bir değişim olduğunu rapor etmişlerdir. Hüseyinoğlu [11]' da AA7075 alüminyum alaşımının freze ile işlenmesi üzerine yaptığı çalışmada benzer şekilde ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını bildirmiştir. Bu çalışmada ilerleme miktarında 0,15 mm/diş' ten 0,1 mm/diş' e ufak bir azalma bile yüzey kalitesinde malzeme cinsi ve takımın kaplama durumuna bağlı olarak %66 ile %100 arasında değişen oranlarda düşüş meydana getirdiği tespit edilmiştir. İlerlemenin artmasıyla beraber kesme bölgesindeki yük artar ve takımda ısınma meydana gelir bunun sonucunda da kesici takımda aşınmalar meydana gelir [12].

Kesme hızlarında oluşan değişim incelendiğinde ise (Şekil 7) kesme hızının 600 m/dk' ya artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde ufak bir artış elde edilirken, 700 m/dk' ya artmasıyla ise yüzeyde iyileşme elde edilebildiği raporlanmıştır. Bu trend tüm parametrelerde tekrarlı deney sonuçlarına dayanarak aynıdır. Kesme hızındaki artışla yüzey pürüzlülüğündeki bu değişimin sebebi olarak hız artışıyla birlikte takım talaş temas uzunluğunun kısılması ve kesme kuvvetlerinin azalması ile deformasyonların küçülmesinin sağlanmasıdır [2]. Kesme hızı arttıkça takım-talaş-iş parçası arayüzünde oluşan tabakanın varlığı değişir. Bu fenomeni tam olarak ölçmek ve nedenlerini ve önleme yöntemlerini belirlemek için daha fazla çalışma gereklidir [13]. Tablo 4 ve Tablo 5'de AA7475-T7351 ve AA2219-T851 alaşımlarının işlenen her bir yüzeyinden alınan tüm ölçümlerin ortalama *Ra* ve *Rz* değerleri gösterilmektedir. Kaplanmamış takımlarla elde edilen işlenmiş yüzeylerin, kaplanmış takımlarla elde edilen yüzeylere göre daha yüksek düzensizliklere sahip olduğu açıktır.



**Tablo 4.** AA7475-T7351 alaşımının talaşlı işlemler sonrası elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük sonuçları

7475-T7351								
WC 1 mm					WC 8 mm			
	İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)		İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)	
	Yüzey Pürüzlülük Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri			
Kesme Hızı	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
500	0,88	4,74575	1,809	8,482333	1,39	7,31312	1,574667	8,518
600	1,02866667	5,496	1,352333	7,023667	1,351667	7,949333	1,492	8,5532
700	0,791	4,13425	1,076	5,31475	1,0625	6,16475	1,589333	9,307
ZrN 1 mm					ZrN 8 mm			
	İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)		İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)	
	Yüzey Pürüzlülük Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri			
Kesme Hızı	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
500	0,72	4,36	1	5,03925	1,08	6,4508	1,333	6,436333
600	0,77533333	4,187	0,809	4,04625	1,103	5,2045	1,543	9,438
700	0,61325	3,3645	0,7985	4,10325	0,733667	4,064	1,453	6,529

**Tablo 5.** AA2219-T851 alaşımının talaşlı işlemler sonrası elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük sonuçları

2219-T851								
WC 1 mm					WC 8 mm			
	İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)		İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)	
	Yüzey Pürüzlülük Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri			
Kesme Hızı	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
500	1,01	5,54325	2,061	10,55325	1,57	7,5015	1,883	10,374
600	1,1505	5,3545	1,2175	7,1335	1,677667	12,443	1,953	13,297
700	0,8095	4,30525	1,3	5,371	1,16775	6,674	1,55975	8,217
ZrN 1 mm					ZrN 8 mm			
	İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)		İlerleme (0,1 mm/diş)		İlerleme (0,15 mm/diş)	
	Yüzey Pürüzlülük Değerleri				Yüzey Pürüzlülük Değerleri			
Kesme Hızı	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)	Ra(μm)	Rz(μm)
500	0,62	3,6855	0,80375	4,17875	1,11	5,98625	1,69	8,1985
600	0,68775	3,981	0,821	4,0455	1,271	8,552	1,5	11
700	0,55025	3,13875	0,67775	3,3695	0,892	5,109	1,515	8,1535

Düşük mekanik özelliğe sahip malzemede (AA2219) aynı talaşlı işlem parametrelerinde yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksektir. Daha sert malzemede (AA7475) daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. AA2219-T851 alaşımında yüzey düzensizliklerinin daha fazla olması, yüzey pürüzlülüğü sonuç tablolarındaki  $R_z$  değerlerinin genel olarak daha yüksek olması ile anlaşılır. AA2219-T851 alüminyum alaşımı %5.8-6.8 oranında bakır içermektedir. Bakır alüminyuma ilave edilen temel alaşım elementlerinden biridir. Genellikle %1-12 oranında katılırlar. %12'den fazla ilavesi yapıda gevreklik oluşturur. Alaşımdaki bakır miktarı arttıkça alaşımın akıcılığı, çekme dayanımı ve sertliği artar. Dövme alaşımlarda bakır %3-5 oranlarında kullanılır. %5'ten fazla kullanıldığı takdirde malzemenin mekanik olarak işlenebilmesi güçleşir [14-15]. AA2219-T851 alaşım malzemesinde bulunan yüksek bakır oranından kaynaklı olarak işlenmesi zor olduğundan yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelebileceği düşünülmektedir. İşlenmesi zor malzemelerin işlenmesi, araştırmacılar için her zaman birincil araştırma alanı olmuştur. Yüzey pürüzlülüğü, işleme proseslerinin performansını değerlendirmek için en önemli

işlenebilirlik göstergelerinden biridir. Bu sorunun ZrN kaplı uç ile işleme yapıldığında çözüldüğü görülmüştür. %5' den yüksek bakır miktarı ile işlenebilir kabiliyetindeki düşüş, daha sert olan bu uç ile aşılabilmektedir. Sert kaplamalar, işleme sıcaklıklarında alt tabakadan daha yüksek bir sertliği korudukları sürece artan aşınma direncine katkıda bulunmaktadır [16]. İşlenmiş yüzeyin yüzey kalitesi kaplamasız takımın kaplamalı takıma göre daha hızlı bozulmuş yani kaplamalı takımlarla frezeleme durumunda düşük pürüzlülükler elde edilmiştir. Sert kaplamaların varlığından dolayı takım-iş parçası arayüzü arasındaki düşük sürtünme katsayısı, bunun arkasındaki olası sebeptir [17]. AA7475-T7351 malzemesinde de %5,2-6,2 oranında çinko bulunmaktadır. Alüminyum esaslı alaşımlarda çinko, sertlik, mukavemet, tribolojik ve işlenebilirlik özelliklerinin yanı sıra yüzey kalitesini de iyileştirdiği bilinir [18]. Yüksek çinko içeren AA7475 alaşımında sert kaplamayla en iyi yüzeyler elde edilse de, WC kesici uç ile de elverişli yüzey özellikleri sağlanabilmektedir (Şekil 5).

Erkal [19] yaptığı çalışmada değişik şartlarda yaşlandırma ısıl işleme tabii tutulmuş AA2024 alaşımının mekanik özellikler ve işlenebilirlik açısından incelemiştir. Düşük çekme dayanımına sahip numunelerde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlüklerinde artış gözlenirken, yüksek çekme dayanımına sahip numunelerde daha düşük pürüzlülük ve kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Vorasri vd. [20] sert takım çeliklerinde yüksek hızda frezelemede işlenen yüzeyin kalitesini incelediklerinde yüksek hızda işleme ilerleme ve talaş kalınlığının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin kesme hızından fazla olduğunu bulmuşlardır. İlerleme değeri düşüktüçe, talaş kalınlığı azaldıkça ve yüksek bir kesme hızında en iyi yüzey durumunu elde etmişlerdir. Bu çalışmada, her iki alüminyum alaşımında da düşük ilerleme miktarı, düşük talaş derinliği ve yüksek kesme hızıyla en iyi yüzey kalitesinin elde edileceği sonucuna varılmıştır. Kesici takıma gelen kesme kuvvetlerin etkisiyle parça istenilmeyen şekilde deforme olabilir. İlerleme miktarı ve talaş derinliği tarafından artan kesme kuvvetleri, yoğun plastik deformasyon etkisiyle özellikle sünek yapıdaki alüminyumun nihai yüzey durumunu olumsuz etkileyebilir [21]. Öte yandan sünek malzemelerde düşük kesme hızları işlem sırasında talaş yığılmasını arttırabilir [22]. Burada kesme hızının makul oranlarda arttırılması kritiktir. Ayrıca sert ZrN kaplamalı uç kullanıldığında yüzey kalitesi iyileşir.

#### 4. Sonuçlar

Yapılan deneyler sonucunda talaş kaldırma esnasında yüzey işleme parametrelerinin ve kesici takımların yüzey kalitesine olan etkisi incelenmiştir. Talaşlı işleme deneylerinde, farklı kesici freze takım ucunun her biri için farklı kesme parametreleri uygulanarak yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Bu deneylerin sonuçlarında AA7475-T7351 ve AA2219-T851 alaşımalarının ideal işlenebilirlik koşulları elde edilmiştir.

- En ideal kesme parametreleri olarak belirlenen 700 mm/dk kesme hızı, 0,1 mm/diş ve 1 mm ilerleme miktarında işlenen AA7475-T7351 malzemede ZrN uç kullanılması ile  $R_a$  değeri 0,791  $\mu\text{m}$ ' den 0,613  $\mu\text{m}$ ' ye azalırken, AA2219-T851 malzemede ZrN uç kullanılması ile  $R_a$  değeri 0,81  $\mu\text{m}$ ' den 0,55  $\mu\text{m}$ ' ye azalmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğüne takımın etkisinin, mekanik dayanımı daha düşük olan AA2219-T851 parçada %32' lik bir etki ile daha yüksek oranda olduğu bulunmuştur.
- Sonuçlar değerlendirildiğinde kesme hızındaki kritik bir artışla beraber yüzey kalitesinin iyileştiği ve yüzeyi olumlu etkilediği görülmektedir. Öte yandan sabit kesme hızında, ilerleme miktarındaki ufak bir düşüş bile yüzeyi oldukça olumlu etkilerken, talaş derinliğinin azalmasıyla kesme kuvvetleri azaldığı için yüzey iyileşmektedir.
- AA2219-T851 malzemesinde mekanik özelliklerinden kaynaklı AA7475-T7351' e göre daha pürüzlü sonuçlar elde edilmiştir.
- Sertliğin göreceli artması yüzey işlenebilirliğini arttırmış bunun yanında AA7475-T7351' in düşük bakır ve yüksek çinko miktarı buna katkı sağlamıştır.
- Yüzey pürüzlülüğünü düşürmek için kesme hızını arttırmak talaşlı imalat işlemlerinde uygulanan yaygın parametre yaklaşımlarından biridir. İlerleme miktarındaki ufak bir düşüş yüzey kalitesine önemli ölçüde katkı sağlar. WC uca göre daha sert ZrN kaplamalı uç kullanılması ile daha iyi yüzey özellikleri elde edilmiştir ve özellikle işlenmesi zor olan AA2219 malzemesi için yazarlar tarafından önerilmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışmada malzeme temini ve talaşlı işlem operasyonları HMS Makine Sanayi tarafından desteklenmiştir. Ayrıca, S.İ. fikir sahibi ve makaleyi yazan, H.K. deneyleri gerçekleştiren ve makaleyi yazan, Y.E tartışma bölümünü yazan ve S.K. ise makaleyi düzenleyen ve giriş bölümünü yazan yazardır.

### Kaynaklar

- [1] Yaka, H. (2021). Tornalama Sonrası Çıkan Talaşlardan Elde Edilen Alüminyum 5000 Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Yöntemi ile Analizi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(1), 464-473
- [2] Dişbudak T. Alüminyum alaşımının talaşlı işlenmesinde ilerleme miktarı, kesme hızı ve kesme derinliğinin yüzey kalitesine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Ocak 2015.
- [3] Pul M. 7075,6061 ve 2024 alüminyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının karşılaştırılması, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*,2017; (9): 65-75.
- [4] Korucu, S. 1996. Hidrolik kopya aparatı yardımı ile elde edilen parçalarda yüzey pürüzlülüğünün deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [5] Nas E, Samtaş G, Demir H, CNC frezelemede yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin matematiksel olarak modellenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2012; (18): 47-59.
- [6] Yontar A, AISI 304 Paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya,2011.
- [7] Yaka, H., Demir, H., Gök, A., & Akkuş, H. (2018). Determination of optimum cutting parameters on free form surfaces in terms of form errors and machining times. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(4), 1153-1164
- [8] Akkuş, H., & Yaka, H. (2021). Optimization of cutting parameters in turning of titanium alloy (grade 5) by analysing surface roughness, tool wear and energy consumption. *Experimental Techniques*, 1-12
- [9] Çetin, M. , Bilgin, M. , Ulaş, H. B. & Tandıroğlu, A. (2011). Kaplamasız Sermet Takımla A1sı 6150 Çeliğinin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi . *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)* , 1 (1) , 168-176
- [10] Gökkaya H, Sur G, Dilipak H, PVD ve CVD kaplamalı sementit karbür kesici takımların işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi, *Teknoloji*, 2004; 7(3):473-478
- [11] Hüseyinoğlu, M., (2008) 7075 Alüminyum Alaşımın Freze ile İşlenmesinde Minimum Soğutma Sıvısı Kullanmanın Performans Karakteristiklerine Etkisi. *Fırat Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 48s, Elazığ.
- [12] Akkuş, H., & Yaka, H. (2021). Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy. *Measurement*, 167, 108465
- [13] Kishawy, H. A., Dumitrescu, M., Ng, E. G., & Elbestawi, M. A. (2005). Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(2), 219-227.
- [14] Kaufman, J. G. (2000). Introduction to aluminum alloys and tempers, p.26, ASM international.
- [15] Açıci, N.(2018). A356 ve A380 alaşımlarının eğilimli soğutucu ile dökümü ve yarı katı dövme işlemi. *Yıldız Teknik Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 59s, İstanbul.
- [16] Prengel, H. G., Pfouts, W. R., & Santhanam, A. T. (1998). State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, 102(3), 183-190.
- [17] Sharma, N., & Gupta, K. (2019). Influence of coated and uncoated carbide tools on tool wear and surface quality during dry machining of stainless steel 304. *Materials Research Express*, 6(8), 086585
- [18] Hekimoğlu A. P, Turan Y. E, Çinko oranının Al-(5-50)Zn alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi, *GÜFBED/GUSTIJ* (2019) 9 (1): 16-25
- [19] Erkal S, AA2024 Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısıl işlemlerinin mekanik özelliklere ve işlenebilirliğe etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara,2011.
- [20] Vorasri, M, Jirapattarasilp, K, Kaewkuekool, S, 2011. The effect of high-speed milling on surface roughness of hardened tool steel. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59: 469-472
- [21] Korkut İ. , Dönertaş M. A. Kesme Parametrelerinin Frezelemede Oluşan Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkileri *Politeknik Dergisi*. 2003; 6(1): 385-391
- [22] Erdoğan M, Gürdal A, Korkut İ. Şeker U, 1999. Çift fazlı çeliklerde martensit hacim oranı ve morfolojinin işlenebilirlik parametrelerinden kesme kuvvetleri üzerine etkisi, *G.Ü., Teknik Eğitim Fakültesi, Politeknik Dergisi*, Cilt 2, Sayı 1, Sa yfa 11-24, Mart 1999



## Dizel Motorlarda Benzin ve Atık Araç Lastiklerinden Elde Edilen Pirolitik Yağın Dizel Yakıt ile Karışımlarının Araştırılması

Mesut UÇAR<sup>1</sup>, Murat KOCAGÜL<sup>2\*</sup>, Burak TANYERİ<sup>3</sup>, Müjdat FIRAT<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Jandarma Genel Komutanlığı, İçişleri Bakanlığı, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Elektrik ve Enerji Programı, Akdağmadeni MYO, Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat, Türkiye

<sup>3</sup>Uçak Bakım Onarım Bölümü, Sivil Havacılık YO, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup>Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup>mesutucar1476@gmail.com, <sup>2\*</sup>murat.kocagul@yobu.edu.tr, <sup>3</sup>buraktanyeri.23@gmail.com, <sup>4</sup>mfirat@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 19/01/2023);

Kabul/Accepted: 10/02/2024)

**Öz:** İçten yanmalı motorlarda alternatif yakıt arayışları uzun yıllardır araştırmaların yoğunlaştığı konulardan birisini oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında, dizel bir motorda atık taşıt lastiklerinden (ATL) elde edilmiş pirolitik yağ (PY) yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonlarına etkileri üzerine bir araştırma yürütülmüştür. ATL piroliz yöntemiyle üretilmiş ve hazır olarak temin edilmiştir. Bu amaçla, 4 zamanlı 4 silindri 1.9 litre hacmine sahip, multijet bir dizel motor üzerinde deneysel bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, dizel yakıtı ve %20 karışım oranlarında benzin B20(%80 dizel + %20 benzin) ve pirolitik yağ P20(%80 dizel + %20 pirolitik yağ) yakıt olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada benzin ve pirolitik yağ kıyaslanarak dizel motorlarda uygulanan çift yakıt metodunda, benzine alternatif bir alternatif yakıt araştırması yürütülmüştür. Çalışmada, maksimum motor momentinin %25 kadar bir motor yükü sabit tutularak değişen motor devirlerinde araştırma yürütülmüştür. Elde edilen verilere göre kullanılan yakıtların motor yakıt sisteminde bir revizyon gerektirmeden kullanılabilmesi gösterilirken, gelişmiş yanma stratejileri için bir bakış açısı ortaya konulmuştur. Özellikle P20 yakıt kullanımında özgül yakıt tüketimi ve termal verimde iyileşme gözlenmiştir. Ayrıca B20 ve P20 kullanımları ile HC emisyonlarının kontrolüne dair umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, mevcut çalışmada kullanılan ATL'den üretilmiş PY'nin dizel motorda alternatif yakıt olarak kullanılabilmesi gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Pirolitik Yağ, Atık Taşıt Lastiği, Kirletici Emisyonlar, Dizel Motor

## An Investigation of Blends of Gasoline and Pyrolytic Oil Derived from Waste Vehicle Tires with Diesel Fuel in Diesel Engines

**Abstract:** Researchers have focused on the search for alternative fuels for internal combustion engines for many years. The effects of pyrolytic oil derived from waste vehicle tires on the combustion and exhaust parameters of diesel engines were investigated in this study. ATL was produced by pyrolysis and is commercially available. For this purpose, an experimental study was carried out on a 4-stroke, 4-cylinder, 1.9 L multi-jet diesel engine. Pure diesel and B20 (80% diesel + 20% gasoline) and P20 (80% diesel + 20% pyrolytic oil) were used as fuel. In this study, gasoline and pyrolytic oil were compared to investigate an alternative fuel to gasoline in the dual fuel method applied in diesel engines. In this study, engine load was kept constant at 25% of maximum engine torque and examined at various engine speeds. The data obtained have shown that the fuels utilized can be used without the engine fuel system needing to be modified. Thermal efficiency and specific fuel consumption both increased, when P20 fuel was used. Moreover, B20 and P20 have been used to decrease HC emissions, and the results are promising. It has been found that the pyrolytic oil made from the used tires of the vehicles used in the current investigation can be used as an alternative fuel in diesel engines.

**Key words:** Pyrolytic Oil, Waste Vehicle Tires, Pollutant Emissions, Diesel Engine

### 1. Giriş

Dünya'da gün geçtikçe artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte enerjiye olan talep artmıştır. Artan talepler doğrultusunda doğada var olan fosil enerji kaynakları azalmaya başlamıştır. Son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalarda, azalan kaynakları korumak ve enerji çeşitliliğine alternatif geliştirmek için, biyodizel, alkol ve petrol içerikli atıklar kullanarak elde edilen sıvılar içten yanmalı motorlarda temel alternatif yakıtlar olarak kullanılmaktadır.

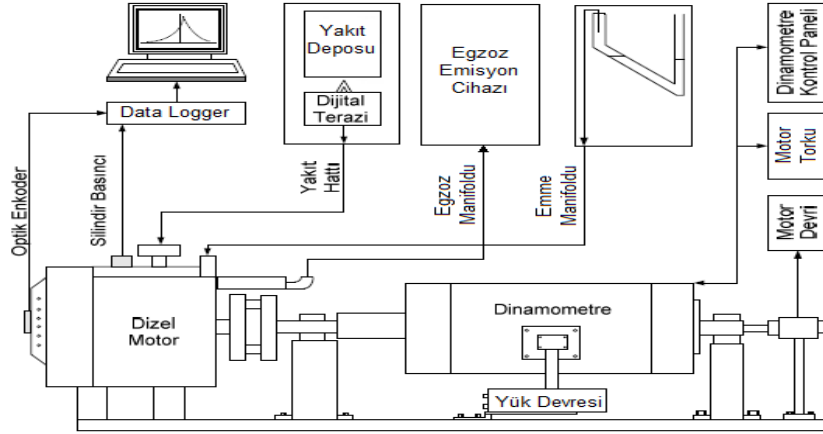
\* Sorumlu yazar: [murat.kocagul@yobu.edu.tr](mailto:murat.kocagul@yobu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-3346-3015, <sup>2</sup>0000-0002-4703-2865, <sup>3</sup>0000-0002-3517-9755, <sup>4</sup>0000-0001-6978-9044

Yüksek verimli olmasından dolayı dizel motorların ulaştırma, tarım ve ticari alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [1]. Buna karşın dizel motorların yüksek emisyon değerleri oluşturmalarından dolayı çevre kirliliğinin başlıca etkenlerinden birisi olduğu bilinmektedir [2]. Dizel araçlar, düşük yakıt tüketimleri ve yüksek torkları nedeniyle ulaşım ve taşımacılık sektörlerinde oldukça fazla tercih edilmektedir. Enerji taleplerindeki artış ve petrol rezervlerinin azalması nedeniyle araştırmacılar dizel motorlar için alternatif yakıtlar üzerinde çalışmaktadırlar [3]. Artan yakıt fiyatları, küresel ısınma, çevresel tahribatlar, fosil yakıtların sağlık üzerindeki negatif etkileri ve özellikle yüksek dizel emisyonları nedeniyle yeni motor yakıtları ve yakıt katkı maddeleri araştırmaları gündeme gelmiştir [4]. Bu kapsamda yapılan alternatif çalışmalardan birisi de zaman içerisinde aşınarak atıl konuma gelen taşıt lastiklerinin geri kazanımı ve dizel motorlarda kullanımlarıdır. Bu atıl durumdaki lastiklerin yok edilmesi hem ülkelerin ekonomisi hem de temiz çevre açısından büyük öneme sahiptir [5]. Atık lastiklerin bertaraf edilmesinde en çok kullanılan metotlardan biri piroliz yöntemidir. Piroliz sonucunda elde edilen sıvı lastik yağları içten yanmalı motorlarda ve enerji üretiminde kullanılmaktadır [6]. TÜİK verilerine göre 2020 yılında Türkiye’de motorlu karayolu taşıt sayısının 23 milyonun geçtiği [7] ve ortalama bir araç lastiğinin kullanım ömrünün beş yıl olduğu kabul edilmiştir. Her yıl dünya çapında yaklaşık 1.5 milyar kullanılmış lastik ortaya çıkmaktadır [8]. Bu sayısal ifadeler ek olarak Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Birliği verilerine göre ise her yıl Avrupa birliğinde 289 milyon lastik satıldığı ve satılan lastiklerin dünya pazarının %20’sini oluşturduğu belirtilmiştir [9]. Bu verilerin de gösterdiği gibi, yıllar geçtikçe atık lastiklerin sayısı katlanarak artmaktadır ve bu sebeple bu lastiklerin bir şekilde faydalı hale getirilmeleri elzem bir hal almıştır. Literatürde yapılan incelemelerde doğal kauçuk bütadien kauçuk (butadiene rubber (BR)) ve stiren-bütadien kauçuk (styrene-butadiene rubber (SBR)) çoğunlukla taşıt lastiklerinin üretiminde kullanıldığı tespit edilmiştir [10]. Yine literatürde yapılan çalışmalarda atıl durumda kullanılmayan lastiklerin, geri dönüşümde değerlendirilmesi için bazı işlemlere tabi tutulduğu görülmüştür. Kumararayer vd.[11] yaptıkları çalışmada, %90 motorine %5 pirolize lastik yağı ve %5 oranında seryum oksit karıştırılarak elde edilen yakıt ile motorin yakıtının kimyasal özellikleri karşılaştırılmıştır. İncelenen performans değerlerine göre; motorine göre ısı veriminde artış, is emisyonlarında ise azalma gözlemlenmiştir. Bodisco vd. araştırmalarında motorin ve atık lastik yağı-motorin (L10) karışımı kullanan hafif dizel motora sahip bir araçta yol testi yaparak NOx emisyonlarını araştırmışlardır. Araç dört farklı koşulda test edilmiştir. Bu sürüşler sırasında %23.7 rölanti, %44,1 şehir içi, %47,3 şehirlerarası (90 km/s) otoban sürüşü nedeniyle her güzergahta toplam 46,6 km yol kat edilmiştir. Yol testleri sonuçlarına göre, L10 ve motorin test yakıtı ile NOx emisyonları arasında önemli bir fark olmadığı tespit edilmiştir [12]. Karagöz vd. [13] çalışmalarında tek silindri bir dizel motorda motorine (0, %10, %30 ve %50) pirolize lastik yağı ekleyerek bir karışım hazırlamışlardır. Prolitik yağ kullanımına bağlı olarak silindir içi basınç ve ısı salınımında artış gözlenirken, HC emisyonlarında önemli azalmalar meydana gelmiştir. Bunun yanında farklı çalışmalarda atık lastiklerden elde edilen yakıtın iyileştirilmesi sonucunda %90 oranına kadar dizel motorlarda kullanılabileceği belirtilmiştir [14]. Farklı bir çalışmada ise atık plastik piroliz yağ karışımlarının oranlarının artması CO, NOx ve is emisyonlarında artışlara sebep oluşturmuştur. Motor performans verileri incelendiğinde ise dizel yakıtlarla karşılaştırılabilecek termik verim değerleri gözlenmiştir [15].

Yukarıda sunulan tüm araştırmalar incelendiğinde atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın alternatif yakıt olarak özellikle dizel motorlarda kullanılabilir olduğu gözlenmektedir. Bu çalışmada, dizel esaslı bir motorda %100 dizel yakıtı %20 oranlarında pirolitik yağ ve benzin karışımları sonucunda sabit motor yükü (maksimum motor momentinin %25’ine kadar) altında ve farklı motor devirlerinde performans ve emisyon değerlerinin analizi yapılmıştır. Bu analiz sonuçlarında silindir içi basıncı, ısı salınım oranları CO emisyonu, HC emisyonu, Özgül yakıt tüketimi, ve fren termal veriminin sonuçları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın alternatif bir yakıt olarak kullanımına katkı sağlayacak ve literatürdeki boşluğu dolduracak niteliktedir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Yapılan çalışmada, atık taşıt lastiklerinin geri kazanılması sonucu elde edilen pirolitik yağın ve benzinin dizel motorlarda kullanımı üzerine çalışılmıştır. Çalışmada dört silindri, dört zamanlı bir dizel motoru, Bosch BEA 150 egzoz emisyon, duman ölçüm cihazı ve Cussons P1860 marka motor dinamometre tezgahı kullanılmıştır [16]. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1’de ve deneyde kullanılan motorun teknik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü[16].

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri

Silindir Sayısı	4
Toplam Silindir Hacmi	1.910L
Çap/Strok	82mm /90.4mm
Sıkıştırma Oranı	18:1
Enjektör Sistemi	Common Rail
Püskürtme Tipi	Çok Püskürtmeli (Multijet)
Maks. Tork	250Nm
Maks. Güç	102BG
Maks. Tork Devri	2000d/d

Silindir içi basınç motorun kızdırma bujisi yerine yerleştirilen Optrand marka bir basınç sensörüyle çalışma boyunca ölçülmüştür. Krank mili çıkışına yerleştirilen bir enkoder yardımıyla ölçülen basınç verisi krank mili açısı cinsinden anlık olarak kaydedilmiştir. NEL Presto Firmasına ait Febris isimli yanma analiz yazılımı ile yanma analizleri yapılmıştır.

Çalışmada benzin, dizel ve pirolitik yağlar olmak üzere üç farklı yakıtın farklı çalışmalarda %20 oranlarından meydana gelmiş karışım yakıtları kullanılmıştır. Literatürde çok farklı oranlarda benzin kullanılan çalışmalar görülmektedir. Bu oranlar incelenerek, motor çalışmasının düzenli olduğu ve yüksek çalışma sorunları bulunmayan oran seçilmiştir. Hazır olarak temin edilen benzin ve pirolitik yağ ayrı ayrı hacimsel olarak %80 dizel ve %20 ikincil yakıt olacak şekilde karıştırılmış ve yakıt tankına doldurulmuştur. Çalışmada kullanılan yakıtların bazı özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Dizel ve benzin yakıtları ticari satış tesislerinden temin edilirken, pirolitik yağ, atık taşıt lastiklerinin bertaraf edildiği bir tesisten temin edilmiştir[16].

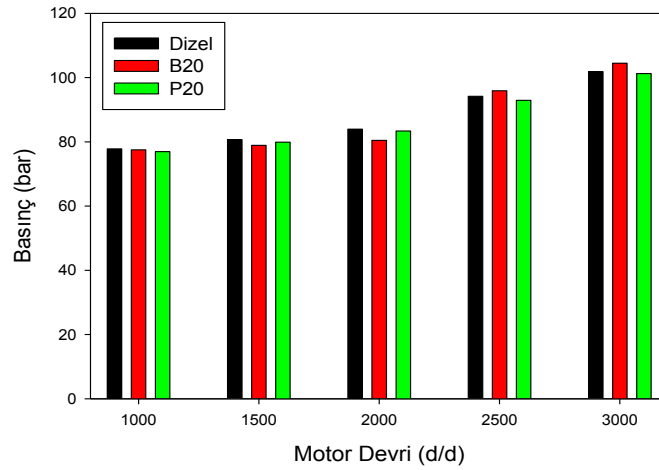
Tablo 2. Çalışmada kullanılan yakıtların özellikleri

Özellikler	Dizel	Benzin	Pirolitik Yağ
Alt Isıl Değeri (Mj/kg)	43.3	44.3	42.767
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	830	727	909
Vizkozite (mm <sup>2</sup> /sn)	2,9	0.55	5.82
Setan Sayısı	55	0-10	28
Oktan Sayısı	--	96	80-112
Buharlaştırma Gizli Isısı (kJ/kg)	301	314	--

Deneyel çalışma, öncesinde deney düzeneğimizde gerekli tüm bakım ve ayarlar titizlikle yapılmıştır. Deneylerde maksimum 250 Nm torka sahip bir motorda farklı oranlarda dizel yakıt, dizel-benzin ve dizel-pirolitiktan oluşan yakıtlar kullanılmıştır. Deneyel çalışmada maksimum motor yükünün %25’ine (62Nm) karşılık gelen sabit motor yüklerinde saf dizel, dizel yakıtı %20 oranlarında pirolitik yağ ve benzin ( P20(%80 dizel + %20 pirolitik yağ) , B20(%80 dizel + %20 benzin )) yakıtlarının kullanıldığı şartlarda ve farklı motor hızlarında (1000- 3000d/d aralığında) test edilecek şekilde deneyel çalışmalar yürütülmüştür.

### 3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 2’de %25 motor yükü ve farklı motor hızları altında silindir içi maksimum basınç oluşumu üç farklı yakıt durumu için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafikte, dizel yakıtın 2000 d/d kadar daha yüksek silindir içi basınca ulaştığı, motor hızının artışına bağlı olarak ise dizel + benzin karışımı şartların en yüksek basınç değerinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun benzinin özellikle yüksek devirlerde oktan sayısının yüksek olmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek oktan sayısına sahip yakıtların tutuşma gecikmesini artırdığı bilinmektedir [17]. Ek olarak çalışmamızda elde edilen sonuçların Fırat ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da olduğu görülmüştür. Bu çalışmaya göre, motor yükü arttıkça benzinin yüksek oktan sayısının tutuşma gecikmesini artırdığı ve buna bağlı olarak ani basınç artışlarına sebep olduğu görülmüştür [18]. Ayrıca, silindir içi maksimum basınç değişiminin özellikle yüksek motor hızlarında, pirolitik yağın viskozitesinin yüksek olduğu ısı değerinin daha düşük olduğu düşünülürse basınç oluşumunun kısmen olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. Tüm motor hızları için yapılan çalışmada silindir içi basınçlar bakımından her üç yakıt için önemli bir sapma görülmemiş olup, kullanılan karışımların dizel motorlarda benzer yanma karakteristiği gösterdiği ve alternatif yakıt olarak kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

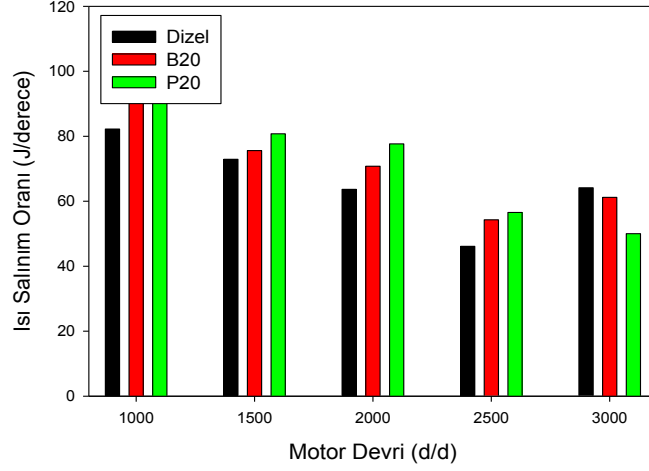


Şekil 2. Silindir içi basıncın motor devrine bağlı değişimi

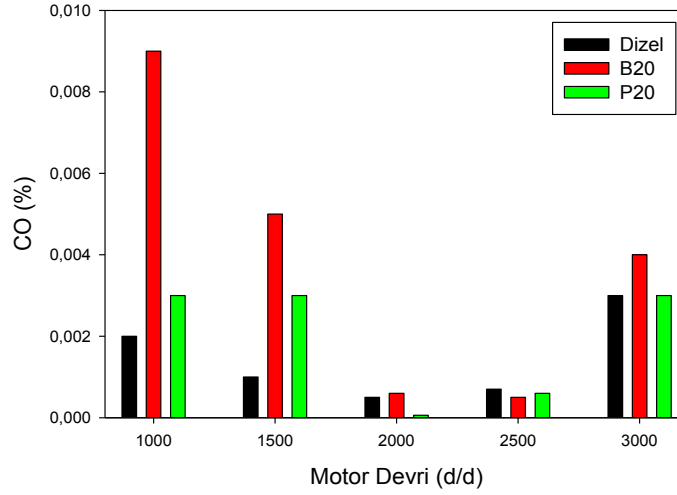
Isı salınım oranlarının farklı yakıt kullanımı ve motor hızlarına bağlı değişimi sabit motor yükü altında Şekil 3’de görülmektedir. Farklı motor devirlerinde pirolitik yağ ve benzin karışımlarının ısı salınım oranları dizelden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Grafik değerleri incelendiğinde çalışılan maksimum motor hızı hariç tüm motor hızlarında benzer eğilim görülmüştür. Şekilde yakıtların ve motor devirlerinin ısı salınım oranlarına etkisi net olarak izlenmiştir. Karışım yakıtlarının ısı değerine bağlı olarak karışım yakıtları durumunda ısı salınım oranlarını etkilediği görülmüştür. Yüksek motor devrinde ise gerek diğer yakıtların soğutma etkisi gerekse yeterli süre bulunmaması sebebiyle özellikle karışım yakıtların maksimum ısı salınım değerlerinin azaldığı görülmektedir. Tüm sonuçlarda devir sayısı artışına bağlı olarak maksimum ısı salınım değerlerinin düşmesi doğrudan motor hızının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4’ de %25 sabit yük altında ve farklı motor hızlarında, farklı yakıt kullanımlarına bağlı olarak CO emisyonunun değişimi gösterilmiştir. CO emisyonunun eksik yanma ürünlerinden olduğu bilinmektedir [19]. Motorun düşük devirlerinde saf dizel yakıtın en düşük CO emisyon değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. 1500 d/d motor hızına kadar farklı yakıt kullanımlarına bağlı olarak CO emisyonu değerleri arasındaki fark daha fazla olduğu görülmüştür. Özellikle B20 ve P20 durumunda kullanılan benzin ve pirolitik yağın buharlaşma ısılarına bağlı olarak silindir için sıcaklıkları azalttıkları ve daha düşük sıcaklıklı yanmaya sebep oldukları bu grafikten çıkarılan önemli sonuçlardır. Bu sebeple CO emisyonlarında özellikle düşük motor hızlarında artış görülmektedir. Bunun yanında motor hızının artışı ile birlikte artan motor sıcaklıkları neticesinde CO emisyonlarında beklenen azalma elde edilmiştir. Fırat ve arkadaşları yaptıkları çalışmada azalan yanma sıcaklık değerinin de CO emisyonunun değişiminde önemli rol oynadığı belirtilmiştir [20].





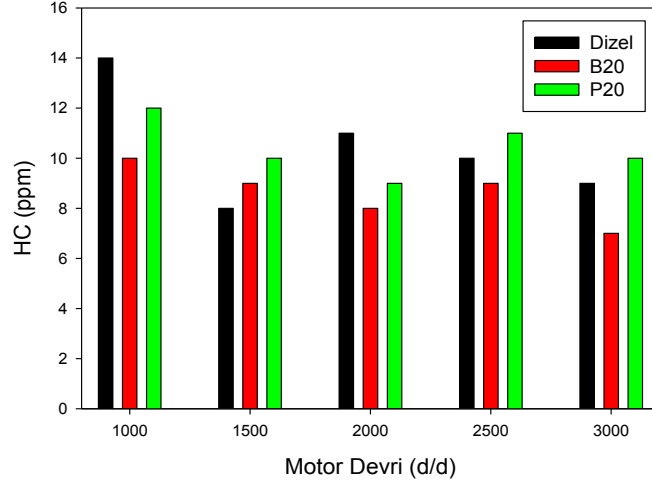
Şekil 3. Motor hızına bağlı ısı salınım oranının değişimi



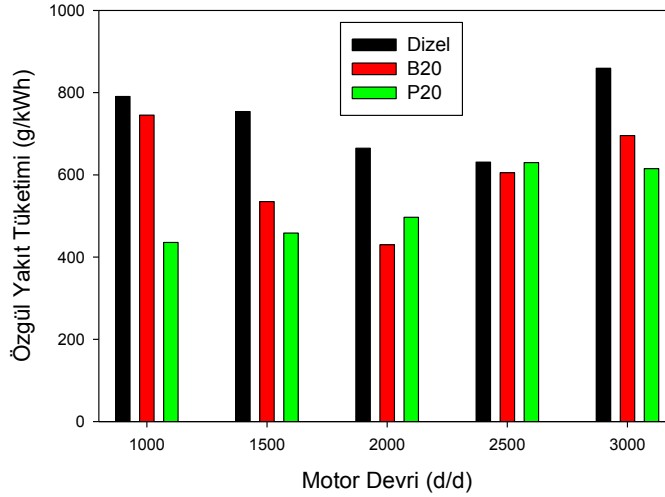
Şekil 4. Motor hızına bağlı CO emisyonunun değişimi

Şekil 5' de %25 yük altında farklı motor devirlerindeki HC emisyonunun değişimi farklı yakıt kullanımlarına bağlı olarak gösterilmiştir. Dizel motorlarda HC emisyonu büyük oranda eksik yanma ve dolgu viskozitesine bağlı olarak oluşan bir emisyon türü olarak bilinmektedir [21,22]. Bununla birlikte, HC emisyonları oluşumu, yakıtın tutuşma gecikmesi, yanma odasında oksijen oranı, yakıtın buharlaşması ve sıcaklıklarının gibi nedenlerden kaynaklanabilir [23]. Deneysel çalışmada B20 karışım yakıtının kullanımında en az HC emisyonu görülmüş olup bunu genel olarak P20 ve saf dizel yakıtları izlemiştir. Motor yük altında iken düşük motor hızlarında HC emisyonlarının arttığı ve yüksek motor hızlarında düştüğü görülmektedir. Bu durum CO emisyonu sonuçları ile uyumakta olup yanmanın iyileşmesi ile HC emisyonlarının azalmasına bir göstergesidir.

Şekil 6'da sabit motor yükü altında farklı devir sayılarına bağlı olarak özgül yakıt tüketiminin değişimi gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi maksimum moment devri olan 2000 d/d'ya kadar özgül yakıt tüketimlerinde dizel ve B20 yakıtları için düşüş görülmüştür. Kullanılan tüm test yakıtları içinde özgül yakıt tüketiminin en düşük değerleri de 2000 d/d elde edilmiş, 2000 d/d'dan sonra özgül yakıt tüketimi değerleri artış göstermiştir. Bu durumun, motor gücü ve momentinin artan mekanik kayıplara bağlı olarak azalmasına bağlı olduğu değerlendirilmiştir. Özgül yakıt tüketimi yakıtın ısı değerine bağlı olarak da değişim göstermektedir. Özgül yakıt tüketimi bakımından değerlendirildiğinde atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağ kullanımı önemli bir alternatif yakıt olarak görülmektedir.



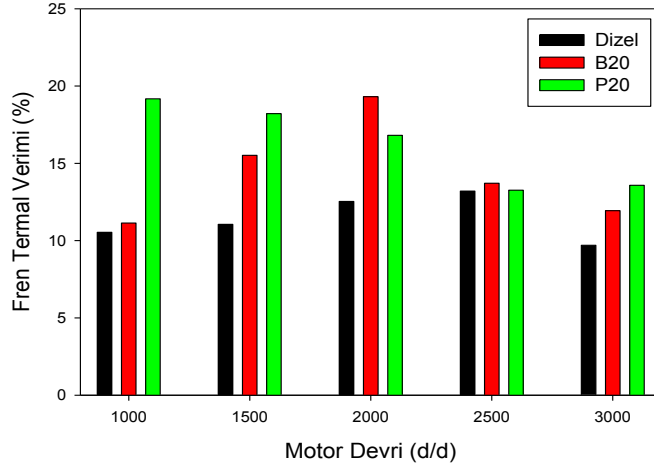
Şekil 5. Motor hızına bağlı HC emisyonunun değişimi



Şekil 6. Özgül yakıt tüketiminin motor hızına bağlı değişimi

Şekil 7’de farklı yakıt tipleri ve sabit motor yükü altında farklı devir sayılarına bağlı olarak fren termal veriminin değişimleri görülmektedir. Grafik incelendiğinde Dizel ve B20 yakıtlarının fren termal verimleri artan motor devriyle 2000 d/d’ye kadar arttığı görülmüştür. P20 yakıtı kullanımında ise verimin daha düşük devirlerde etkin olduğu görülmektedir. En yüksek fren termal verimleri tüm test yakıtları için 2000 d/d elde edilmiştir. P20 yakıtının ise önce yüksek olduğu ve motor hızına bağlı azaldığı görülmüştür.

Genel olarak fren termal verimlerinin saf dizel yakıtı göre karışimli yakıtlardan daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca değişen motor devirleri için P20 yakıtı etkin sonuçlar göstermiştir. Düşük özgül yakıt tüketimine bağlı olarak elde edilen motor performansındaki değişim termal verimleri doğrudan etkilemiş olup, dizel motorlarda alternatif yakıt olarak atık taşıt lastiklerinden elde edilmiş pirolitik yağ kullanımı bakımından umut verici sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7. Fren termal veriminin değişimi

#### 4. Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışma, 4 zamanlı 4 silindirli 1.9 litre hacmine sahip, multijet bir dizel motorda üç farklı yakıt (Saf dizel, %20 karışım oranlarında ( P20(%80 dizel + %20 pirolitik yağı) , B20(%80 dizel + %20 benzin), %25 sabit motor yükü ve değişen motor devirlerinde emisyon ve performans etkilerini içermektedir. Çalışmadan elde edilen önemli çıkarımlar aşağıda sunulmuştur.

- Silindir içi basıncında motor devri ile önemli bir değişiklik olmamasına rağmen, karışım yakıtlarında yüksek motor devirlerinde daha yüksek silindir içi basıncına neden olduğu bulunmuştur. Tüm yakıtlar benzer maksimum basınç değerleri sağlamıştır.
- Hem B20 hem de P20 karışımları için farklı motor devirlerinde ısı salınımının dizelden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Maksimum ısı salınım oranlarının motor devrine bağlı olduğu gösterilmiştir.
- CO emisyonunun 2000 d/d'ya kadar saf dizel ve karışımli yakıtların azaldığı 2000 d/d'dan sonra arttığı gözlemlenmiştir. P20 kullanımı CO emisyonlarını indirgeme bakımından B20 yakıtından daha etkin görülmüştür.
- HC emisyonu tüm devirlerde en düşük B20 yakıtı kullanımı durumunda elde edilmiştir. Karışım yakıtlar HC emisyonları bakımından genel olarak sürdürülebilir olarak değerlendirilmiştir.
- Özgül yakıt tüketiminin B20 ve P20 kullanımı durumunda saf dizel yakıtına göre daha az olduğu görülmüştür.
- Fren termal verimi B20 ve P20 yakıtı kullanımdan saf dizel yakıtına kıyasla daha yüksek olarak elde edilirken, P20 kullanımı daha etkin olarak değerlendirilmiştir.

Yürütülen çalışma neticesinde ATL'den elde edilen pirolitik yağın dizel motorlarda kullanımının araştırılması sağlanmış olup, alternatif yakıt olarak kullanımı gösterilmiştir. Çalışmanın farklı karışım oranları motor yükleri altında tekrarı veya farklı yanma stratejilerine uygulanması gelecek çalışmalar için mümkün olabilecektir.

#### Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmayı TEKF.17.04 proje numarasıyla destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür eder.

### Kaynaklar

- [1] Ebrahimi M, Jazayeri SA. Effect of hydrogen addition on RCCI combustion of a heavy duty diesel engine fueled with landfill gas and diesel oil. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2019; 44(14): 7607-7615.
- [2] Rao YK, Krishna BB. Modeling diesel engine fueled with tamanu oil-Diesel blend by hybridizing neural network with firefly algorithm. *Renewable Energy*, 2019; 134: 1200-1212.
- [3] Demirbas A, Demirbas MF. Importance of algae oil as a source of biodiesel. *Energy conversion and management*, 2011; 52(1): 163-170.
- [4] Giakoumis EG, Rakopoulos CD, Dimaratos AM, Rakopoulos DC. Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012;38(5): 691-715.
- [5] Öztöp HF, Varol, Y, Altun, Ş, Fırat M. (2014). Using gasoline-like fuel obtained from waste automobile tires in a spark-ignited engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2014; 36(13): 1468-1475.
- [6] İsmailoğlu E, Piroalize Atık Lastik Yağı-Motorin Karışımının Common-Rail Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kocaeli 2021
- [7] TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu), [Erişim tarihi: 14.03.2020], <http://www.tuik.gov.tr>
- [8] Baškovič UŽ, Seljak T, Katrašnik T. Feasibility analysis of 100% tire pyrolysis oil in a common rail Diesel engine. *Energy*, 2017;137: 980-990.
- [9] European tyre and rubber manufacturers' association (ETRMA). <https://www.etrma.org/>, Yıllık rapor. [Erişim tarihi: 27.01.2020]
- [10] Barlow F W. *Rubber compounding: principles, materials, and techniques*, M. Dekker, New York, 9–55, 1993.
- [11] Kumaravel ST, Murugesan A, Vijayakumar C, Thenmozhi M. Enhancing the fuel properties of tyre oil diesel blends by doping nano additives for green environments. *Journal of Cleaner Production*, 2019;240: 118128.
- [12] Bodisco TA, Rahman SA, Hossain FM, Brown RJ. On-road NOx emissions of a modern commercial light-duty diesel vehicle using a blend of tyre oil and diesel. *Energy Reports*, 2019;5: 349-356.
- [13] Karagöz M, Ağbulut Ü, Sarıdemir S. Waste to energy: Production of waste tire pyrolysis oil and comprehensive analysis of its usability in diesel engines. *Fuel*, 2020;275: 117844.
- [14] Doğan O, Çelik MB, Özdalyan B. The effect of tire derived fuel/diesel fuel blends utilization on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 2012; 95: 340-346.
- [15] Mani M, Nagarajan G, Sampath S. and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. *Energy*,2011; 36(1): 212-219.
- [16] Uçar M, Dizel motorlarda atık taşıt lastiklerinden elde edilen pirolitik yağın yanma ve emisyon karakteristiklerine etkilerinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,2017.
- [17] Chen G, Shen Y, Zhang Q, Yao M, Zheng Z, Liu H. Experimental study on combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with 2, 5-dimethylfuran–diesel, n-butanol–diesel and gasoline–diesel blends. *Energy*,2013; 54: 333-342.
- [18] Fırat M, Altun S, Okcu, M, Varol Y. of the effect of gasoline premixed ratio and engine load on the combustion and exhaust emission characteristics of an RCCI Engine. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 2022;37(1): 541-554.
- [19] Devarajan Y, Jayabal R, Munuswamy DB, Ganesan S, Varuvel EG. Biofuel from leather waste fat to lower diesel engine emissions: Valuable solution for lowering fossil fuel usage and perception on waste management. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022;165: 374-379.
- [20] Fırat M, Altun Ş, Okcu M, Varol Y. Comparison of ethanol/diesel fuel dual direct injection (DI2) strategy with reactivity controlled compression ignition (RCCI) in a diesel research engine. *Energy*, 2022; 255: 124556.
- [21] Imtenan S, Varman M, Masjuki HH, Kalam MA, Sajjad H, Arbab MI, Fattah IR. Impact of low temperature combustion attaining strategies on diesel engine emissions for diesel and biodiesels: A review. *Energy Conversion and Management*, 2014;80: 329-356.
- [22] Yıldız M, Çeper BA. A comparative study on gasoline/diesel-fueled RCCI combustion at different premixed ratios and high-EGR diesel CI combustion in an IC engine under low load conditions. *Fuel*, 2022;324: 124596.
- [23] Okcu, M, Varol Y, Altun Ş, Fırat M. Effects of isopropanol-butanol-ethanol (IBE) on combustion characteristics of a RCCI engine fueled by biodiesel fuel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021;47: 101443.

## Enerji Depolama ile Elektrik Dağıtım Şebekesinin İşletme Maliyeti Optimizasyonu

Fatma AVLİ FIRIŞ<sup>1\*</sup>, İsrail KARADÖL<sup>2</sup>, Ökkeş Fatih KEÇECİOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik ve Enerji Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Kilis, Türkiye

\*<sup>1</sup> fatma.avlifiris@akedasdagitim.com.tr, <sup>2</sup> israilkaradol@kilis.edu.tr, <sup>3</sup> fkececioglu@ksu.edu.tr

(Geliş/Received: 08/05/2023;

Kabul/Accepted: 10/11/2023)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı, yenilenebilir ve dağıtık enerji kaynaklarının bulunduğu elektrik dağıtım şebekesinin fider ölçeğinde enerji depolama sistemi kullanılarak minimum işletme maliyeti sağlamaktır. Şebekenin işletim optimizasyonu, çalışmada geliştirilen iki aşamalı stokastik programlama problemi ile ele alınmıştır. Problem, General Algebraic Modelling System (GAMS) aracılığıyla doğrusal bir model olan Mixed Integer Linear Programming (MILP) ile formüle edilmiş ve CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür. Modellemedeki belirsizliklerin ele alınabilmesi için Monte Carlo Simülasyonu aracılığıyla senaryo üretimi ve azaltımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin etkinliğini doğrulamak için gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları, IEEE-33 test baraları üzerinde uygulanmıştır. İşletme maliyetleri olası şebeke koşulları altında hesaplanmış ve kendi aralarında enerji depolamanın kullanımlarına göre karşılaştırılmıştır. Edinilen sonuçlara göre, şebekeye enerji depolama sistemi entegre edildiği durumlarda, depolama sisteminin hiç bulunmadığı durumlara göre işletme maliyetinde yalnızca bir günlük ortalama zaman periyodunda 200 doları aşkın bir düşüş gözlenmiştir. Böylece önerilen sistemle birlikte enerji depolamanın optimum şekilde programlanmasının; işletme maliyetlerini düşürmede ve dolayısıyla güç sistemlerinin en kritik konularından biri olan ekonomik optimizasyonun sağlanmasında etkin bir yöntem olduğu doğrulanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Dağıtım sistemleri, monte carlo simülasyonu, optimal planlama, maliyet.

## Operating Cost Optimization of Electricity Distribution Network with Energy Storage

**Abstract:** The aim of this study is to provide minimum operating cost by using the energy storage system at the feeder scale of the electricity distribution network with renewable and distributed energy sources. The operating optimization of the network is handled with the two-stage stochastic programming problem developed in the study. The problem was formulated with Mixed Integer Linear Programming (MILP), a linear model, through the General Algebraic Modeling System (GAMS) and solved with the CPLEX solver. In order to deal with the uncertainties in the modeling, scenario generation and reduction were carried out through Monte Carlo Simulation. Simulation studies carried out to verify the effectiveness of the proposed model were applied on IEEE-33 test busbars. Operating costs were calculated under possible grid conditions and compared among themselves according to the use of energy storage. According to the results, in cases where the energy storage system is integrated into the grid, a decrease of more than 200 dollars was observed in the operating cost in only one day's average time period compared to the cases where the storage system is not available at all. Thus, the optimum programming of energy storage with the proposed system; It has been proven to be an effective method in reducing operating costs and thus providing economic optimization, which is one of the most critical issues of power systems.

**Key words:** Distribution systems, monte carlo simulation, optimum planning, cost.

### 1. Giriş

Doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenme yeteneğine sahip olan ve konvansiyonel olmayan enerji, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji olarak isimlendirilmektedir [1]. Dağıtık üretim ise, dağıtım şebekesine bağlı, tüketim noktasında veya yakınında müşterilere yerinde hizmet veren elektrik üretim sistemlerini ifade etmektedir [2]. Batarya depolama, elektrikli araçlar, kojenerasyon santralleri gibi enerji kaynakları “dağıtık üretim kaynakları” olarak tanımlanırken, rüzgar türbinleri, fotovoltaik üniteler, hidroelektrik santraller, jeotermal santraller ve biyokütle santralleri gibi kaynaklar “yenilenebilir dağıtık üretim kaynakları” olarak tanımlanmaktadır [3]. Günümüz ekonomik ve doğal ortamında, yenilenebilir ve dağıtık üretim tesislerinin

\* Sorumlu yazar: [fatma.avlifiris@akedasdagitim.com.tr](mailto:fatma.avlifiris@akedasdagitim.com.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4879-1932, <sup>2</sup> 0000-0002-9239-0565, <sup>3</sup> 0000-0001-7004-4947

entegrasyonunun hızla arttığı elektrik dağıtım sistemlerinde enerji tedarik sürekliliğinin ve dağıtım esnekliğinin daha iyi sağlanması için tüm kaynakların bir arada optimal kullanılması büyük önem taşımaktadır. Özellikle enerji depolama sistemlerinin bu entegrasyonlarda doğru planlamalarla efektif kullanımları, elektrik arzının karşılanmasına katkı sağlayabildiği gibi ekonomik açıdan da oldukça olumlu sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir.

Bu alanda kapsamlı bir literatür incelemesi gerçekleştirildiğinde, enerji depolamalı yenilenebilir ve dağıtık enerji kaynaklarının optimum planlanması konusunda birçok çalışmanın ön plana çıktığı görülmüştür. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu mikro şebeke ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Kumar ve arkadaşları [4] elektrik üretim maliyetini en aza indirmek amacıyla yenilenebilir kaynakların mevcudiyetinde bir mikro şebekede üretim ve depolama tesislerinin gün öncesinden programlanması sorununu ele almıştır. Problem doğrusal bir maliyet fonksiyonu dikkate alınarak formüle edilmiş ve optimizasyon kısmını çözmek için Yapay Balık Sürüsü zekası kullanılmıştır. Yang ve arkadaşları [5] ana şebekeden izole halde bir mikroşebekenin işletme maliyetini minimize etmek için yedek rezerv hizmeti sağlayan enerji depolama sistemi kullanarak Chance Constrained Programming (CCP) tabanlı programlamaya dayalı optimal planlama modeli sunmuştur. Luo ve arkadaşları [6] fotovoltaik, rüzgar, yakıt hücresi, mikro türbin ve batarya enerji depolama sistemini içeren şebeke bağlantılı mikroşebeke için Modified Bat Algorithm (MBA) optimizasyonu kullanarak yeni bir enerji yönetim sistemi önermişlerdir. Önerilen sistemde mikroşebekenin gün öncesi planlamasında farklı günlerin ve mevsimlerin çeşitli ışınımlarının etkisi değerlendirilerek mikroşebekede bulunan fotovoltaik sistem için yeni bir matematiksel model sunulmuştur.

Aktif elektrik dağıtım şebekelerinin optimal planlaması kapsamında ana şebekeyle bağlantılı olarak ele alınan araştırmalar incelendiğinde ilgili araştırmaların ağırlıklı olarak ekonomik işletmeye odaklandığı görülmektedir. Optimal planlama modelinin amaç fonksiyonu genellikle şebekeden satın alınan veya şebekeye satılan elektrik miktarı ile belirlenmektedir. Zhang ve arkadaşları [7], dağıtım sistemi işletiminin toplam giderlerini en aza indirmek için, talep karşılama ve pil enerji depolama sistemlerini dikkate alan bir optimizasyon modeli önermiştir. Bu amaçla yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek penetrasyonuna sahip dağıtım sisteminin gün öncesi planlama analizi için matlab/simulink yoluyla modifiye edilmiş bara sistemine dayalı bir simülasyon platformu geliştirmişlerdir. Wang ve arkadaşları [8] aktif dağıtım şebekesinde depolama teknolojileri ile güneş ve rüzgar enerjisi üretimini kullanan entegre bir enerji sistemi planlama modeli önermiş, iki aşamalı hiyerarşik enerji yönetimi çerçevesi ile en uygun planlama stratejisini önermiştir. Ho ve arkadaşları [9] biyo kütle ve güneş enerjisi kaynaklarını içeren hibrit bir enerji üretim sistemine entegre edilmiş enerji depolamanın planlamasını günlük ve haftalık işletim modlarında incelemişlerdir. Ayrıca her iki modun avantaj ve dezavantajlarını karşılaştırarak maliyet analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Literatür araştırması, enerji depolama sistemleri ile yenilenebilir veya dağıtık üretim tesislerini içeren sistemlerin ekonomik optimizasyonunun çeşitli çalışmalara konu olduğunu ve bu minvaldeki sorunların çözülebilmesi amacıyla farklı buluşsal ve matematiksel tekniklerin geliştirildiğini göstermektedir [10]. Ancak bu durum beraberinde aktif bir dağıtım şebekesinin farklı olası koşullar altında optimizasyonunun sağlanması konusunda yetersiz kalmıştır. Çünkü, aktif bir sistem olan dağıtım şebekesinde rutin işletim kalıplarının dışında, beklenmedik ve büyük bir değişiklik olması muhtemeldir. Örneğin, beklenmeyen hava olayları (ör. bulutlanma, rüzgarın yavaşlaması ya da birden durması gibi) veya beklenmedik arıza akımları nedeniyle, yüksek güçlü bir yenilenebilir enerji santrali, entegre halde bulunduğu bir fiderde durma noktasına gelebilir. Bu durumun yanı sıra, fider üzerinde yüksek miktarda yük harcayan sanayi tesislerinin resmi veya dini bayramlarda duruşa geçerek devreden çıkması, şebeke yükünü çok düşük seviyelere getirebilir. Aynı mantıkla enerji talebinin değişkenliğiyle piyasa fiyat dalgalanması yaşanabilir. Bu sebeplerden ötürü, aktif dağıtım şebekelerinde depolama planlaması ve maliyet optimizasyonunun olası koşulları kapsayacak surette gerçekleştirilmesi kritik önemdedir. Nitekim yürütülen bu çalışmanın temel amacı, yenilenebilir ve dağıtık üretim kaynaklarıyla entegre halde; çift akış yönlü ve girift bir yapıdaki elektrik dağıtım şebekesini tüm yönleriyle düşünüp ekonomik optimizasyonu sağlayabilmektir. Bu kapsamda geliştirilen modelleme ile, olası tüm şebeke koşullarının göz önünde bulundurulması suretiyle şebekede enerji depolama sistemi kullanılmadığı, baz kapasitede kullanıldığı ve iki kat kapasiteyle kullanıldığı durum setlerinde ayrı ayrı işletme maliyetleri hesaplanarak ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analizler ve sonuçların ele alınma şekilleri, makalenin özgün yönünü ortaya koymaktadır.

Bu makalenin başlıca katkıları şu şekilde özetlenebilir:

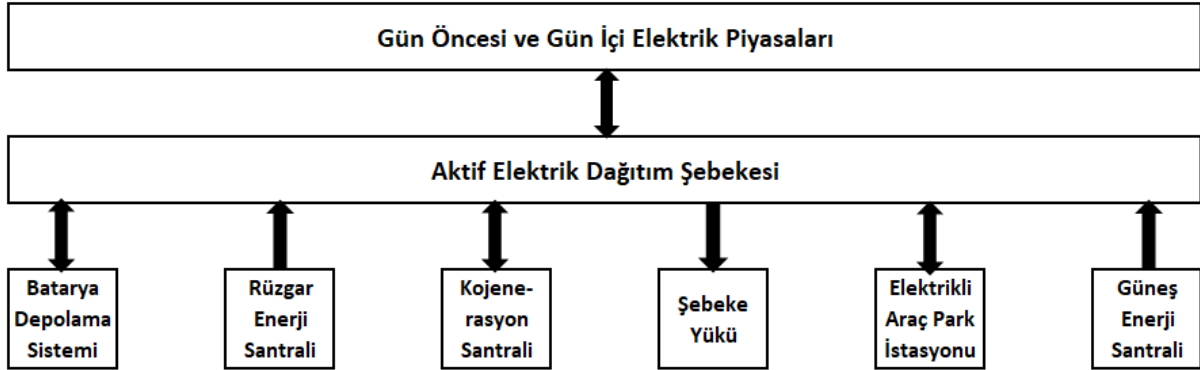
- Önerilen model, fider ölçeğinde ele alınan aktif dağıtım şebekesinin; yenilenebilir enerji kaynakları, dağıtık üretim tesisleri, elektrikli araçlar ve batarya enerji depolama birimlerinden optimum şekilde yararlanmasını ve fazla elektriği ana şebekeye satmasını sağlamaktadır.
- Amaç fonksiyonu olan ekonomik optimizasyon, şebekenin işletme maliyeti olarak ele alınmış ve hesaplanan işletme maliyetleri olası farklı durum setleri altında; şebekede depolama bulunmaması,

baz kapasitede bulunması ve çift kapasitede kullanılması durum setleri altında incelenerek analiz edilmiştir.

Bu ilk bölümde bir giriş, literatür taraması ve çalışmanın katkısı sunulurken, 2. Bölüm'de önerilen metodoloji, matematiksel model, amaç fonksiyonu ve problemin kısıtlamaları hakkında bilgiler verilmektedir. 3. Bölüm'de, durum bazlı simülasyon çalışmaları verilirken, 4. Bölüm'de çalışmadan edinilen sonuçlar sunulmaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Çalışmada önerilen iki aşamalı matematiksel model, genel itibariyle dağıtım şebekesindeki nodal güç dengesi, yukarı akış ağı ve güç işlemleri ile ilgili teknik kısıtlamaları yerine getirirken işletme maliyetini minimize etmektedir. Burada ilk aşama gün öncesi elektrik piyasalarında, ikinci aşama ise gün içi elektrik piyasalarında gerçekleştirilen işlemleri temsil etmektedir. Aktif elektrik dağıtım şebekesi, bu piyasalarla enerji alışverişi içerisinde. Tasarlanan yapıda; şebekede entegre halde bulunan yenilenebilir ve dağıtık üretimlerden üretilen enerji öncelikle şebekenin iç ihtiyacı olan yükler tarafından kullanılmaktadır. İlave enerji ihtiyacını karşılamak için gün öncesi ve gün içi piyasalardan satın alınmakta, üretilen fazla enerji ise yine bu piyasalara satılmaktadır. Burada ana fikir, şebekede yenilenebilir ve dağıtık üretimler ve şebeke yükleri dahil olmak üzere birden fazla kontrol edilebilir kaynağın göz önünde bulundurulmasıyla, böyle bir sisteme enerji depolama sistemi entegre edilmesiyle elektrik piyasasında optimal işlemim sağlamaktır. Şekil 1'de verilen bu yapının görselinde anlaşılacağı üzere rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerindeki yukarı yönlü işaret şebekeye verilen enerjiyi, şebeke yükünde aşağı yönlü işaret şebekeden çekilen enerjiyi, batarya enerji depolama sistemi, elektrikli araç park istasyonu, kojenerasyon santrali ve piyasa-şebeke arası çift yönlü işaretler ise hem enerji alışını hem enerji verişini ifade etmektedir.



Şekil 1. Elektrik dağıtım şebekesi ve elektrik piyasası etkileşimi

Ele alınan problem, karma tam sayılı doğrusal program olarak modellenmiştir ve problemin çözümüne yönelik önerilen çerçevede amaç fonksiyonu, elektrik dağıtım sisteminin toplam işletme maliyetini en aza indirmek suretiyle ekonomik optimizasyon sağlamaktır. Bu durum temelde, fiyatlar düşüken satın almak ve fiyatlar yükseken satış yapmak anlamına gelmektedir. Burada amaç fonksiyonu; gün öncesi piyasalarında hesaplanan maliyet ile gün içi piyasalarında beklenen maliyetin toplamı olup bir gün için belirlenen 24 saatlik periyotta minimize edilmek istenen toplam işletme maliyetidir. İlk aşamayı oluşturan gün öncesi elektrik piyasası işlemlerinde yer alan; A1 ile ifade edilen karar değişkenleri, üretim kaynaklarının aktif güç çıkışlarını, yüklerin aktif güç tüketimlerini ve yukarı yönlü şebeke güç akışlarını içermekte ve talep tarafı rezervlerinin konuşlandırılması gibi önceden planlanmış değişkenlerin gerçekleştirilmesini kapsamaktadır. Bu karar değişkenleri gün öncesi piyasalarında verilen kararlarla yorumlanmakta ve herhangi bir özel senaryoya bağlı olmamaktadır. İkinci aşamada kullanılan gün içi elektrik piyasası işlemlerinde yer alan; A2 ile gösterilen karar değişkenleri ise şebekenin gerçek zamanlı işletiminde ikili güç akışına ilişkin süreçleri kapsamakta ve senaryolara bağlı durumların oluşmasından etkilenmektedir. Modellemede toplam işletme maliyetinin gösterimi, iki aşamalı karar değişkenlerinin toplamından oluşan amaç fonksiyonu ile ifade edilmekte ve matematiksel gösterimi aşağıda verilmektedir.

$$\text{Min } OF = \sum_{t=1}^{24} (C_{A1,t} + EC_{A2,t\omega}) \quad (1)$$

Amaç fonksiyonunun ilk aşamasını oluşturan gün öncesi piyasası işlemlerinde yer alan  $C_{A1,t}$ , ana şebeke ana şebekeden enerji alımı, ana şebekeye enerji satışı ve bir gün önce talep tarafı rezervleriyle kararlaştırılan bir fiyat üzerinden belirlenen enerji maliyetleri eksi müşteriye satılan enerji dahil olmak üzere, gün öncesinde belirlenen maliyetleri ifade etmektedir. Amaç fonksiyonunun ikinci aşamasını oluşturan gün içi piyasası işlemlerinde yer alan  $EC_{A2,t\omega}$  ise ana şebeke ile güç alışverişini ayarlamının beklenen maliyetleri, talep tarafı rezerv tahsis maliyeti, yük kesinti maliyetleri, geleneksel dağıtık üretimin başlatma ve üretim maliyetleri dahil olmak üzere gün içinde beklenen maliyetleri ifade etmektedir. Beklenen maliyet kapsamında, gerçek zamanlı olarak bir gün öncesinde planlanan enerji miktarından sapma ne kadar büyükse, bu maliyet de o kadar yüksek olacaktır. Bir gün önce belirlenen kullanılabilir kapasiteden sapma ne kadar yüksek olursa, talep yönlü rezerv tahsis maliyeti de o kadar yüksek olacaktır. Öte yandan şebekede enerji üretim ve enerji tüketim eşitliğinin sağlanamaması durumunda yük kesintisi zorunlu olacaktır. Ancak bu durum tercih edilmek istenmeyen bir durumdur ve kesinti maliyeti oldukça yüksek olacaktır. Gün öncesi ve gün içi piyasalarında yer alan  $C_{A1,t}$  ve  $EC_{A2,t\omega}$  değerlerine dahil olan maliyet unsurları Eşitlik (2) ve (3)'te verilmektedir.

$$C_{A1,t} = (\lambda_t^{A1,Al} * P_t^{A1,Al}) - (\lambda_t^{A1,Sat} * P_t^{A1,Sat}) + (\lambda_t^{TT,Y} * R_t^{TT,Y}) + (\lambda_t^{TT,A} * R_t^{TT,A}) + (\lambda_t^{A1,DG} * P_t^{A1,DG}) \quad (2)$$

$$EC_{A2,t\omega} = \sum_{\omega=1}^N \pi_{\omega} [(\lambda_{t\omega}^{A2,Al,+} * \Delta P_{t\omega}^{A2,Al,+}) - (\lambda_{t\omega}^{A2,Al,-} * \Delta P_{t\omega}^{A2,Al,-}) + (\lambda_{t\omega}^{A2,Sat,-} * \Delta P_{t\omega}^{A2,Sat,-}) - (\lambda_{t\omega}^{A2,Sat,+} * \Delta P_{t\omega}^{A2,Sat,+}) + \lambda_{t\omega}^{DEP} * (R_{t\omega}^{DEP,Y} - R_{t\omega}^{DEP,A}) + (\lambda_{t\omega}^{YAT} * P_{t\omega}^{YAT}) + (\lambda_{t\omega}^{A2,DG,SMP} * P_{t\omega}^{A2,DG})] \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitliklerde verilen genel itibariyle; t zaman periyodunu,  $\omega$  gün içerisinde beklenen durumun gerçekleşme olasılığını,  $\lambda$  piyasa fiyatını, P aktif gücü,  $\Delta P$  aktif gücün sapma miktarını ve R talep tarafı rezervini ifade etmektedir. Buna ek olarak birinci aşama karar değişkenleri dâhilinde yer alan Al ve Sat ifadeleri gün öncesi piyasasından satın alım ve piyasada satış anlamına gelirken, TT talep tepkisini, Y ve A yukarı ve aşağı yönlü talep değişimlerini ve DG kojenerasyon santralini ifade etmektedir. İkinci aşama karar değişkenleri dahilinde ise; + ve - pozitif ve negatif sapsmaları, DEP güç dağıtımını, YAT yük atmaya ve SMP sistem marjinal fiyatını ifade etmektedir.

## 2.1. Aşama-1 kısıtları

Aşağıdaki denklemler, birinci aşama kararları kapsamında gerekli olan kısıtlamaları temsil etmektedir.

$$P_t^{A1,DS} + P_t^{A1,Al} - P_t^{A1,Sat} = 0 \quad (4)$$

$$P_t^{A1,DS} = P_t^{A1,RES} + P_t^{A1,GES} + P_t^{A1,DG} + P_t^{A1,Bat,-} + P_t^{A1,EV,-} - P_t^{A1,Yük} - P_t^{A1,Bat,+} - P_t^{A1,EV,+} \quad (5)$$

$$P_t^{A1,RES,min} \leq P_t^{A1,RES} \leq P_t^{A1,RES,max} \quad (6)$$

$$P_t^{A1,GES,min} \leq P_t^{A1,GES} \leq P_t^{A1,GES,max} \quad (7)$$



$$P_t^{A1,DG,min} \leq P_t^{A1,DG} \leq P_t^{A1,DG,max} \quad (8)$$

$$P_t^{A1,Yük,min} \leq P_t^{A1,Yük} \leq P_t^{A1,Yük,max} \quad (9)$$

Denklem (4), her zaman dilimindeki güç dengesini ifade eder. Denklem (5)'te,  $P_t^{A1,DS}$  yukarı ve aşağı doğru enerji akışını belirtir. Bu enerji akışında, üretilen rüzgar, güneş, konvansiyonel dağıtık üretim ve depolama deşarj gücünün toplamı ile şebeke yükü ve depolama şarj gücünün toplamı eşit olmalıdır. Yenilenebilir ve konvansiyonel dağıtılmış üretimlerin alt ve üst sınırları Kısıt (6), (7) ve (8) ile ifade edilirken, şebeke yükünün talep tahmininin alt ve üst limitleri Kısıt (9) ile ifade edilir. Üretimler ve tüketimler, bu kısıtlamalarla önceden tanımlanmış aralıklar içinde olmalıdır.

$$SOC_t^{A1,Bat} = SOC_{t-1}^{A1,Bat} + \left( \frac{\eta_t^{A1,Bat} * \Delta T}{E_t^{A1,Bat,max}} \right) * (P_{t-1}^{A1,Bat,+} - \left( \frac{P_{t-1}^{A1,Bat,-} * \Delta T}{\eta_t^{A1,Bat} * E_t^{A1,Bat,max}} \right)) \quad (10)$$

$$SOC_t^{A1,Bat,min} \leq SOC_t^{A1,Bat} \leq SOC_t^{A1,Bat,max} \quad (11)$$

$$0 \leq P_t^{A1,Bat,+} \leq \sigma * P_t^{A1,Bat,+,max} \quad (12)$$

$$0 \leq P_t^{A1,Bat,-} \leq \eta_t^{A1,Bat} * (1 - \sigma) * P_t^{A1,Bat,-,max} \quad (13)$$

$$SOC_t^{A1,EV} = SOC_{t-1}^{A1,EV} + \left( \frac{\eta_t^{A1,EV} * \Delta T}{E_t^{A1,EV,max}} \right) * (P_{t-1}^{A1,EV,+} - \left( \frac{P_{t-1}^{A1,EV,-} * \Delta T}{\eta_t^{A1,EV} * E_t^{A1,EV,max}} \right)) \quad (14)$$

$$SOC_t^{A1,EV,min} \leq SOC_t^{A1,EV} \leq SOC_t^{A1,EV,max} \quad (15)$$

$$0 \leq P_t^{A1,EV,+} \leq \vartheta * P_t^{A1,EV,+,max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_t^{A1,EV,-} \leq \eta_t^{A1,EV} * (1 - \vartheta) * P_t^{A1,EV,-,max} \quad (17)$$

Batarya depolama cihazının her zaman dilimindeki şarj durumu (SOC), Denklem (10)'a göre hesaplanmaktadır. Kısıt (11) batarya SOC'sinin alt ve üst sınırlarını verirken, Kısıt (12) ve (13) batarya depolama cihazının şarj ve deşarj gücünün alt ve üst sınırlarını verir. Benzer şekilde Denklem (14) elektrikli araç istasyonu (EV) durumunu çeşitli zaman aralıklarında hesaplamaktadır. EV şarj durumu alt ve üst limitleri Kısıt (15)'te, şarj ve deşarj gücünün alt ve üst limitleri Kısıt (16) ve (17)'de verilmiştir. Yine  $\sigma$  ve  $\vartheta$  sırasıyla bu kısıtlamalarda

bataryanın ve EV'nin şarj ve deşarj işlemlerinin aynı anda aktif olmadığını göstermektedir. Burada  $n$  dönüştürme verimliliği katsayısı,  $P$  aktif güç,  $E$  depolama biriminin enerji kapasitesidir.

$$0 \leq P_t^{A1,Al} \leq \alpha * P_t^{A1,Al,max} \quad (18)$$

$$0 \leq P_t^{A1,Sat} \leq (1-\alpha) * P_t^{A1,Sat,max} \quad (19)$$

Kısıt (18) ve (19), ana şebekeden alınan veya ana şebekeye satılan enerjinin belirli bir üst ve alt limit içinde olduğunu belirtmektedir. Burada  $\alpha$  ikili bir değişkendir (0 veya 1'e eşittir) ve eş zamanlı alım satım işleminin aktif olmadığını göstermektedir.

$$0 \leq P_t^{A1,Al} \leq \alpha * P_t^{A1,Al,max} \quad (20)$$

$$0 \leq P_t^{A1,Sat} \leq (1-\alpha) * P_t^{A1,Sat,max} \quad (21)$$

Son olarak Kısıt (20) ve (21), yukarı ve aşağı yönlü kullanılabilir rezerv talebinin özellikle belirli bir üst sınırdan olduğunu göstermektedir.

## 2.2. Aşama-2 kısıtları

Aşağıdaki denklemler, ikinci aşama kararları için kısıtlamaları olan; şebekenin gerçek zamanlı çalışmasına ilişkin kısıtlamaları temsil etmektedir.

$$P_{t\omega}^{A2,DS} + P_{t\omega}^{A2,Al} - P_{t\omega}^{A2,Sat} = 0 \quad (22)$$

$$P_{t\omega}^{A2,DS} = P_{t\omega}^{A2,RES} + P_{t\omega}^{A2,GES} + P_{t\omega}^{A2,DG} + P_{t\omega}^{A2,Bat,-} + P_{t\omega}^{A2,EV,-} + P_{t\omega}^{YAT} - P_{t\omega}^{A2,Yük} - P_{t\omega}^{A2,Bat,+} - P_{t\omega}^{A2,EV,+} \quad (23)$$

$$P_{t\omega}^{A2,RES,min} \leq P_{t\omega}^{A2,RES} \leq P_{t\omega}^{A2,RES,max} \quad (24)$$

$$P_{t\omega}^{A2,GES,min} \leq P_{t\omega}^{A2,GES} \leq P_{t\omega}^{A2,GES,max} \quad (25)$$

$$P_{t\omega}^{A2,DG,min} \leq P_{t\omega}^{A2,DG} \leq P_{t\omega}^{A2,DG,max} \quad (26)$$

$$P_{t\omega}^{A2,Yük,min} \leq P_{t\omega}^{A2,Yük} \leq P_{t\omega}^{A2,Yük,max} \quad (27)$$

Denklem (22), güç dengesini gerçek zamanlı olarak açıklamaktadır. Burada  $P_{t\omega}^{A2,DS}$ , şebeke tarafından tüketilen veya üretilen aktif gücün yukarı ve aşağı doğru enerji akışını ve gerçek zamanlı değerini ifade etmektedir. Denklem (23)-(27), Denklem (5)-(9)'a benzer şekilde olup yenilenebilir üretimlerin, konvansiyonel dağıtılmış üretimin ve yükün gerçek zamanlı çalışmasını ifade etmektedir.

$$SOC_{t\omega}^{A2,Bat} = SOC_{(t-1)\omega}^{A2,Bat} + \left(\frac{\eta_{t\omega}^{A2,Bat} * \Delta T}{E_{t\omega}^{A2,Bat,max}}\right) * (P_{(t-1)\omega}^{A2,Bat,+} - \left(\frac{P_{(t-1)\omega}^{A2,Bat,-} * \Delta T}{\eta_{t\omega}^{A2,Bat,-} * E_{t\omega}^{A2,Bat,max}}\right)) \quad (28)$$

$$SOC_{t\omega}^{A2,Bat,min} \leq SOC_{t\omega}^{A2,Bat} \leq SOC_{t\omega}^{A2,Bat,max} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{A2,Bat,+} \leq \zeta * P_{t\omega}^{A2,Bat,+,max} \quad (30)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{A2,Bat,-} \leq \eta_{t\omega}^{A2,Bat} * (1 - \zeta) * P_{t\omega}^{A2,Bat,-,max} \quad (31)$$

$$SOC_{t\omega}^{A2,EV} = SOC_{(t-1)\omega}^{A2,EV} + \left(\frac{\eta_t^{A2,EV} * \Delta T}{E_t^{A2,EV,max}}\right) * (P_{(t-1)\omega}^{A2,EV,+} - \left(\frac{P_{(t-1)\omega}^{A2,EV,-} * \Delta T}{\eta_{t\omega}^{A2,EV,-} * E_t^{A2,EV,max}}\right)) \quad (32)$$

$$SOC_{t\omega}^{A2,EV,min} \leq SOC_{t\omega}^{A2,EV} \leq SOC_{t\omega}^{A2,EV,max} \quad (33)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{A2,EV,+} \leq \vartheta * P_{t\omega}^{A2,EV,+,max} \quad (34)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{A2,EV,-} \leq \eta_{t\omega}^{A2,EV} * (1 - \vartheta) * P_{t\omega}^{A2,EV,-,max} \quad (35)$$

Benzer şekilde Denklem (28)-(35), Denklem (10)-(17)'ye benzer şekilde batarya depolama ve elektrikli araç istasyonunun gerçek zamanlı çalışmasını ifade etmektedir. İki farklı denklem seti arasındaki temel fark, buradaki değişkenlerin senaryolara bağlı olmasıdır.

Bu aşamada yer alan, gerçek zamanlı güç akışına ilişkin eşitlikler daha detaylı analiz edilecek olursa; Denklem (22)'de yer alan son iki terimin ana şebekenin yukarı akış şebekesi ile güç ticaretini yansıttığı ve aşağıdaki şekilde hesaplandığı ifade edilebilir:

$$P_{t\omega}^{A2,Buy} = \Delta P_{t\omega}^{A2,Al} + P_t^{A1,Al} \quad (36)$$

$$P_{t\omega}^{A2,Sat} = \Delta P_{t\omega}^{A2,Sat} - P_t^{A1,Sat} \quad (37)$$

Denklem (38) ve (39)'daki amaç, Kısıt (18) ve (19)'dakine benzemektedir ve ana şebekeden alınan veya ana şebekeye satılan enerjinin gerçek zamanda belirli bir üst ve alt limit içinde olduğunu belirtmektedir. Burada da şikili bir değişkendir (0 veya 1'e eşittir) ve eş zamanlı alım satım işleminin aktif olmadığını göstermektedir.

$$0 \leq P_{t\omega}^{A2,Al} \leq (1 - \psi) * P_{t\omega}^{A1,Al,max} \quad (38)$$

$$0 \leq P_{t\omega}^{A2,Sat} \leq \psi * P_{t\omega}^{A1,Sat,max} \quad (39)$$

Denklemler (40) ve (41), şebeke ile ana şebeke arasında gerçekleşen güç işleminin, pozitif ve negatif sapma değişkenleri ile ayarlanabilen programlanan değerden sapabileceğini belirtmektedir. Bu hesaplama sürecinde yer alan kısıtlamalar aşağıdaki gibidir:

$$\Delta P_{t\omega}^{A2,Al} = \Delta P_{t\omega}^{A2,Al,+} - \Delta P_{t\omega}^{A2,Al,-} \quad (40)$$

$$\Delta P_{t\omega}^{A2,Sat} = \Delta P_{t\omega}^{A2,Sat,+} - \Delta P_{t\omega}^{A2,Sat,-} \quad (41)$$

Kısıt (42)-(45), (40) ve (41)'deki değişkenler için sapmaların sınırlarını belirler.  $\lambda$  ve  $\rho$  ikili değişkenleri, sırasıyla piyasadan elektrik satın alma ve piyasaya satma senaryolarına ilişkin sapmaların yönünü tanımlar.

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{A2,Al,+} \leq (1 - \lambda) * P_{t\omega}^{A2,Al} \quad (42)$$

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{A2,Al,-} \leq \lambda * P_{t\omega}^{A2,Al} \quad (43)$$

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{A2,Sat,+} \leq (1 - \rho) * P_{t\omega}^{A2,Sat} \quad (44)$$

$$0 \leq \Delta P_{t\omega}^{A2,Sat,-} \leq \rho * P_{t\omega}^{A2,Sat} \quad (45)$$

Son olarak denklem (46) ve (47), yine ilk aşamadaki denklem (20) ve (21)'deki mantıkla, bu kez gerçek zamanda talep tarafı rezervlerinin konuşlandırılması için üst ve alt sınırları belirlemektedir.

$$0 \leq R_{t\omega}^{DEP,Y} \leq R_t^{TT,Y} \quad (46)$$

$$0 \leq R_{t\omega}^{DEP,A} \leq R_t^{TT,A} \quad (47)$$

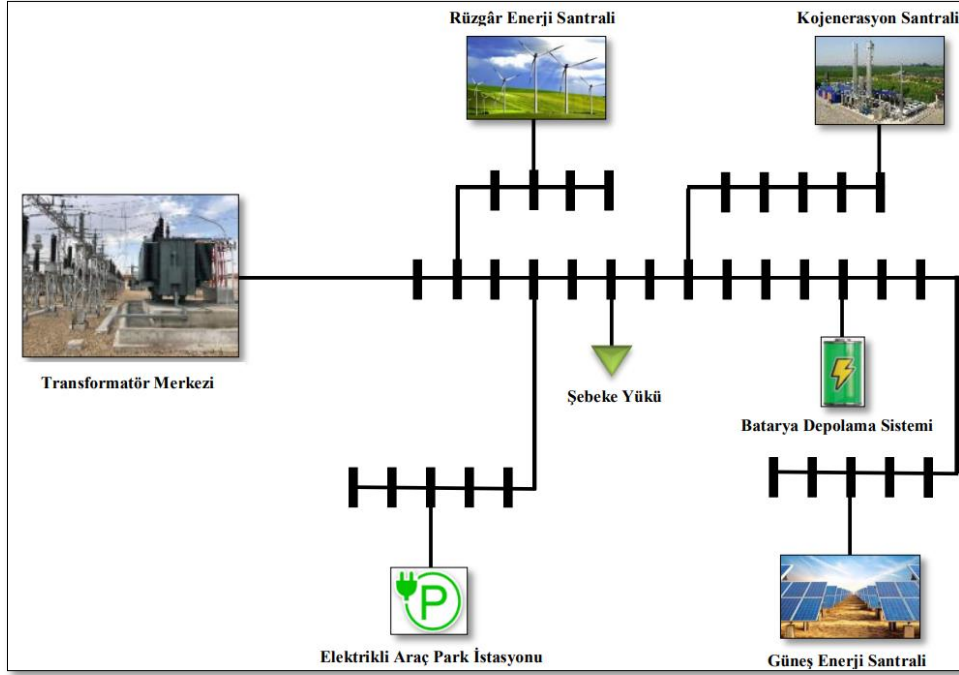
Bu aşamada ele alınacak olan senaryoların oluşturulmasında, piyasa fiyatı, yük, rüzgar hızı ve güneş radyasyonu gibi belirsizlik faktörleri göz önünde bulundurulmuştur. Bu faktörlerin tarihsel verilerine dayanarak, Monte Carlo simülasyon yöntemi kullanılarak çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Bu kapsamda ele alınan belirsiz parametrelerin olasılık dağılımlarına ilişkin veriler simülasyon çalışmaları başlığı altında detaylı olarak aktarılmıştır. Monte Carlo Simülasyonu, belirsizlik faktörlerinin bulunduğu durumlarda yürütülen simülasyon çalışmalarında, karmaşık amaç fonksiyonlarının optimizasyonunda kullanılan, bir veya daha fazla olasılık dağılımından rasgele sayıların seçilmesi tekniğidir. Bu yöntem, yüzlerce deney yapmadan veya binlerce örnek oluşturmadan, belirlenen aralıkta binlerce hatta onbinlerce veriyi kapsayabilir. Yöntemin bir probleme uygulanması, problemin rastgele sayılar kullanılarak simüle edilmesi ve bu simülasyonların sonuçlarına bakılarak hesaplanacak parametrenin yaklaşık olarak hesaplanması fikrine dayanmaktadır. Böylece, farklı olasılık fonksiyonları, bir dizi rasgele sayı kullanarak model içinde farklı sonuçları hesaplamaktadır [11].

Genel itibariyle planlama optimizasyonu kapsamında yürütülen çalışmalar incelendiğinde belirsizliklerin giderilmesi için Monte Carlo yönteminin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Örneğin, dağıtılmış jeneratör çıkışlarının ve yük tüketimlerinin belirsizliklerini hesaba katmak için Wang ve ark. [12] problemleri stokastik bir program olarak formüle etti ve belirsizlikleri ele almak için monte carlo yöntemini kullandı. Somma ve ark. [13], güneş ışınımı ile ilgili 24 saatlik senaryoları modellemek için Monte Carlo simülasyon yöntemini kullanarak aktif dağıtım şebekesinin işletme stratejileri için stokastik çok amaçlı bir doğrusal programlama problemi formüle ettiler. Shahzad ve ark. [14], yük ve dağıtılmış jeneratör belirsizliklerini göz önünde bulundurarak, aktif bir dağıtım şebekesinin olasılıklı aşırı yük risk değerlendirmesi ile ilgilendiler. Çalışmada sayısal Monte Carlo simülasyon yaklaşımı kullanılarak hat aşırı yük risk indekslerini değerlendirmek için değiştirilmiş IEEE 13-bus test sistemi kullanılmıştır. Talep profilleriyle ilgili sınırlamanın üstesinden gelmek için Zio ve ark. [15], elektrik gücü tüketiminin içsel değişkenliğini açıklayan Monte Carlo simülasyonuna dayalı bir olasılık değerlendirmesi ile dağıtılmış jeneratörlerin penetrasyon problemini ele aldı. Conti ve ark. [16], fotovoltaiik dağıtılmış jeneratörler ile dağıtım ağlarındaki yük akış probleminin çözümünü ele aldılar. Fotovoltaiik dağıtılmış jeneratör üniteleri tarafından üretilen aktif gücün ve yükler tarafından emilen gücün tahmini için önerilen model, güneş enerjisi mevcudiyeti ve yük değişiminin belirsizliğini temsil etmek için kullanılmıştır. Model, Monte Carlo teknikleri kullanılarak geliştirilmiş bir radyal dağıtım olasılıklı yük akış programına dahil edilmiştir. Izadi ve ark. [17], talep belirsizliği altında dağıtım merkezlerinin optimal sayısını ve yerini belirleyen bir yöntem önerdi. Belirsizliği dikkate almak için, Monte Carlo Simülasyonuna dayalı olarak müşteri talepleri için bir dizi olası senaryo oluşturulur. Yukarıda belirtilen referanslar, bu yöntemin bu alandaki çalışmalarda yararlılığını ve güvenilirliğini teyit etmektedir.

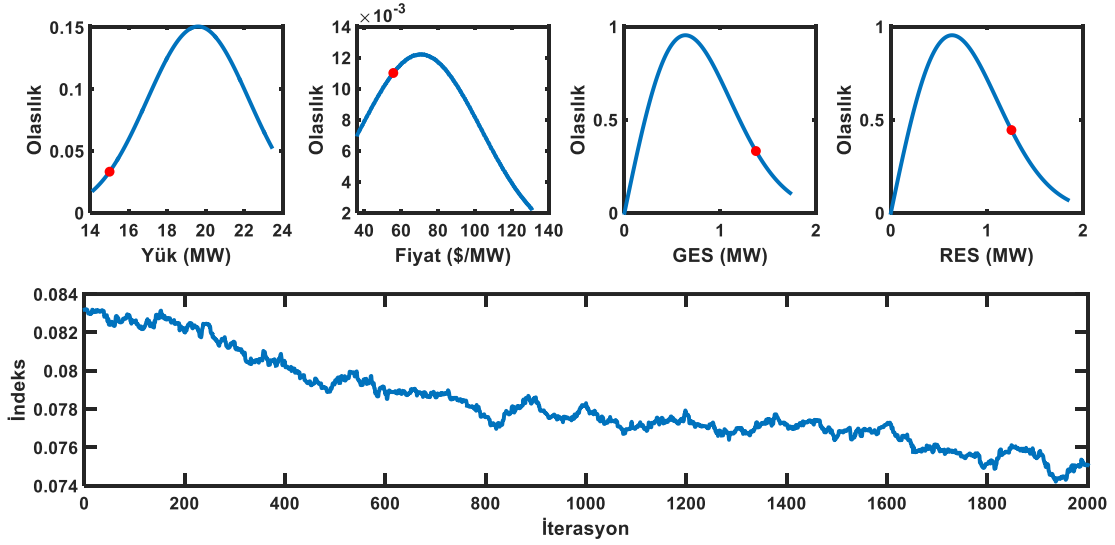
### 3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, önerilen stokastik doğrusal programlama modeli, bir dizi tesisle birlikte IEEE 33 baralı test sistemi temelinde oluşturulmuş fider ölçeğinde bir dağıtım şebekesine uygulanmaktadır. IEEE 33 baralı test sistemi, şebeke analizlerine ilişkin yürütülen simülasyon çalışmalarında sıkça yararlanılan; sistemdeki yüklerin dengede ve hatların süseptans değerlerinin sıfır olarak varsayıldığı dağıtım sistemidir [18]. Bu test sistemi üzerinde; çalışma kapsamında ele alınan güneş enerji santrali, rüzgar enerji santrali, kojenerasyon santrali, batarya enerji depolama sistemi, elektrikli araç park istasyonu ve şebeke yüklerinin gösteriminin sağlandığı tek hat şeması Şekil 2’de gösterilmektedir.

Üretim tesisleri dataları referans alınan bir kaynaktan toplanarak elde edilmiştir [19]–[24]. Fiili yük profili ve enerji fiyatları ise New York Independent System Operator'dan alınmıştır. Bu veriler Tablo 1’de verilmiştir. Hesaplanan olasılık mesafeleri Monte Carlo simülasyonu [25], [26] motoruna verilmiş ve çok sayıda senaryolar üretilmiştir. Hesaplanan olasılık dağılımlarının sonuçları Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Test sistemi üzerinde çalışılan tesislerin gösterimi.



Şekil 3. Yük, fiyat ve üretimlerin olasılık dağılımları.

Monte Carlo simülasyonu tarafından üretilen çok sayıda senaryo daha sonra aynı grup içinde en yakın olasılıkları sunmak için olasılık uzaklığı algoritmasına göre indirgenmiş ve sonuçta en yakın olasılıkların aynı grupta toplandığı 5 olasılık paketi oluşturulmuştur [27], [28]. Bu kapsamda hesaplanmış olan tüm durumların senaryoları ve olasılık yoğunluklarının kesişimlerinden oluşan nihai senaryo sonuçları elde edilmiştir. Edinilen nihai senaryolardan oluşturulan senaryo sonuçlarının toplamı 1'e eşittir. Senaryo paketleri bazında hazırlanmış olan; yük, fiyat, üretimler ve tüm durumlara ait senaryoların sonuçları Tablo 3'te sunulmaktadır.

**Tablo 1.** Rüzgâr, güneş, yük ve fiyat verileri.

Zaman	RES (MW)		GES (MW)		Yük (MW)		Fiyat (\$)
	PRESmax	PRESmin	PGESmax	PGESmin	PYükmax	PYükmin	Al&Sat
t1	1.293	0.057	0.000	0.000	19.767	5.814	42.400
t2	0.000	0.000	0.000	0.000	17.610	5.179	39.210
t3	0.516	0.023	0.000	0.000	16.187	4.761	38.040
t4	0.953	0.042	0.000	0.000	15.177	4.464	36.820
t5	1.529	0.068	0.000	0.000	14.167	4.167	36.260
t6	1.505	0.067	0.000	0.000	15.177	4.464	37.870
t7	0.877	0.039	0.003	0.001	16.799	4.941	38.860
t8	0.526	0.023	0.069	0.029	17.610	5.179	46.510
t9	0.808	0.036	0.308	0.128	19.079	5.611	50.020
t10	1.016	0.045	0.586	0.244	19.706	5.796	58.010
t11	1.630	0.072	0.735	0.306	20.318	5.976	68.350
t12	0.521	0.023	0.972	0.405	20.685	6.084	75.850
t13	0.802	0.035	1.073	0.446	20.808	6.120	90.090
t14	0.288	0.012	0.897	0.373	20.731	6.097	105.870
t15	0.868	0.038	0.444	0.185	20.624	6.066	123.900
t16	1.135	0.050	0.220	0.092	20.792	6.115	129.850
t17	0.738	0.033	0.058	0.024	21.817	6.417	130.520
t18	0.712	0.031	0.004	0.001	23.439	6.894	124.730
t19	0.760	0.033	0.000	0.000	23.317	6.858	99.980
t20	1.839	0.082	0.000	0.000	22.965	6.754	78.290
t21	0.943	0.042	0.000	0.000	22.506	6.619	71.620
t22	0.941	0.042	0.000	0.000	21.726	6.390	66.050
t23	0.107	0.004	0.000	0.000	20.486	6.025	57.970
t24	1.589	0.071	0.000	0.000	19.155	5.634	46.720

**Tablo 2.** Üretim, tüketim ve fiyat parametrelerinin olasılık dağılım karakteristikleri.

Olasılık Dağılım Karakteristikleri											
GES		RES		Yük				Fiyat			
Pmin (MW)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Pmax (MW)	Ortalama	Standart Sapma	$\lambda_{min}$ (\$/MWh)	$\lambda_{max}$ (\$/MWh)	Ortalama	Standart Sapma
0,00	1,73	0,00	1,84	14,16	23,43	19,61	2,65	36,26	130,52	70,57	32,70

**Tablo 3.** Senaryo sonuçları.

Senaryo Paketleri ve Sonuçları					
Senaryo Paketi	Yük Senaryo Sonucu	Fiyat Senaryo Sonucu	GES Üretimi Senaryo Sonucu	RES Üretimi Senaryo Sonucu	Nihai Senaryo Sonucu
1	17.642	75.920	0.498	0.477	0.002
2	17.789	79.279	0.719	0.721	0.016
3	18.413	81.759	0.881	0.935	0.060
4	19.384	83.025	1.009	1.069	0.191
5	20.988	94.136	1.191	1.254	0.732

Enerji depolama verileri ise varsayımsal olarak oluşturulmuştur. Şebeke uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ve bu alandaki analiz çalışmalarına uygun niteliklerde depolama teknolojileri olan batarya ve elektrikli araç istasyonu (EV) depolama olarak kullanıldığı varsayılmıştır. Burada, bataryalar sabit depolama cihazı, EV'ler ise park süreleri boyunca depolama hizmetleri sağlayabilen mobil depolama cihazı olarak kabul edilmiştir. Depolama birimlerinin kapasiteleri batarya ve EV için 1.5 MW olarak belirlenmiştir. Bu varsayımda, enerji depolama sistemi kapasitesinin, mevcut durumda sisteme entegre haldeki yenilenebilir enerji kaynaklarının maksimum çıkış güçlerine (güneş enerji santrali için 1.73 MW ve rüzgar enerji santrali için 1.84 MW) yakın bir değer seçilmesi kıstası göz önünde bulundurulmuştur. Depolama birimlerinin sarj/deşarj verimlilikleri, literatürde yaygın olarak kabul gören %90 değerinde alınmış, güçleri ise hem depolama sistemlerinin pratik uygulamalarında asgari düzeyde alınan rakam olan hem de seçilen depolama kapasitesine uygun değer aralığında bulunan 0.5 MW olarak belirlenmiştir. Bu depolama parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Depolama parametreleri.

Depolama Tipi	Depolama Parametreleri	Parametre Değerleri
Batarya/ EV	E <sub>max</sub> (MWh)	1.5
	P <sub>sarjmax</sub> (MW)	0.5
	P <sub>deşarjmax</sub> (MW)	0.5
	SOC <sub>max</sub> (%)	90
	SOC <sub>min</sub> (%)	0

Bu veriler ışığında oluşturulan model daha sonra Genel Cebirsel Modelleme Sisteminde (GAMS) karma tamsayılı doğrusal programlama modeli (MILP) olarak kodlanmış ve CPLEX çözücü kullanılarak çözülmüştür. Simülasyon çalışmaları, şebekede depolama bulunup bulunmamasına göre oluşturulan durum setleri altında gerçekleştirilmiştir. Her bir durum seti altında belirlenen durumların karşılıkları; yük, güneş enerjisi santrali üretimi ve rüzgâr enerjisi üretimi değerlerinin maksimum ya da minimum seviyede olduğu durumlar olacak şekilde Tablo 5'te verilmektedir. Burada depolama olmayan ve baz kapasitede bulunan durum setlerinde; 3 parametrenin (yük, güneş ve rüzgâr enerjisi üretimi) maksimum ya da minimum seviyede olma durumlarının tüm kombinasyonları sağlanmıştır. Depolamanın iki kat kapasitede kullanıldığı durum setinde ise tüm kombinasyonların yarı sayısı kadar durum karşılığı oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen analizler ile hesaplanan; şebekede enerji depolamanın bulunmadığı, baz kapasitede bulunduğu ve iki kat kapasitede bulunduğu durum setleri altında hesaplanan işletme maliyetleri, Tablo 6'da özetlenmiştir. Genel itibarıyla dip toplamda en düşük işletme maliyeti ve durum başına ortalama en düşük işletme maliyeti depolamanın iki katına çıkarıldığı durum setinde görülürken bu sıralamayı depolamanın baz değerinde bulunduğu ve bulunmadığı setler takip etmiştir. Her bir durum setinde ise şebeke yükünün en düşük, yenilenebilir üretimlerin en yüksek düzeyde gerçekleştiği durumlarda en düşük işletme maliyeti görülmüştür.



**Tablo 5.** Durum setleri altında yük ve yenilenebilir üretim durumları.

	Depolama Yok								Depolama Var								Depolama 2 Kat Var			
Durum	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20
<b>Yük</b>	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Min	Max	Max	Min	Min
<b>GES</b>	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
<b>RES</b>	Min	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Min	Max	Min	Max	Min

Sonuçlar teknik ayrıntılarıyla ele alındığında, şebekenin yük talebinin en düşük, yenilenebilir kaynaklara dayalı üretimlerinin en yüksek düzeyde gerçekleşmesiyle ana şebekeye satılacak enerji maksimum olup ana şebekeden alınacak enerji miktarı en düşük olacağından dolayı toplam işletme maliyeti dramatik şekilde düşmüş olacaktır. Şebekede depolama kullanılmayan duruma göre baz kapasitede depolama kullanılması durumunda, yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerji fazlası, gerçekleştirilen optimizasyon sayesinde en uygun zamanda ve miktarda depolanıp yine en uygun zamanda ve miktarda şebekeye satıldığından toplam işletme maliyeti daha da düşmektedir. Depolama kapasitesinin artmasıyla daha fazla enerji miktarıyla işlem yapılacağından ve işlem hacmi büyüyeceğinden, işletme maliyeti diğer durumlara nazaran en düşük düzeyde olmaktadır. Şebekenin yük talebi en yüksek düzeyde olduğunda şebekede yenilenebilir kaynaklar da minimum düzeyde üretim gerçekleştirir ise şebekenin yüksek miktarda olan yük ihtiyacını karşılamak için ana şebekeden satın alınacak olan enerji miktarı da yüksek olacağından toplam işletme maliyeti tüm durumlar içerisinde en yüksek değerlerde olacaktır. Yenilenebilir kaynakların kısmen ya da tümüyle en yüksek düzeyde üretim gerçekleştirilmesiyle şebekeden satın alınacak enerji miktarı düşeceğinden toplam işletme maliyeti nispeten düşecektir. Şebekede depolama kullanıldığında işletme maliyetindeki düşüş daha belirginleşecek olup depolama kapasitesinin artmasıyla daha fazla düşmüş olacaktır.

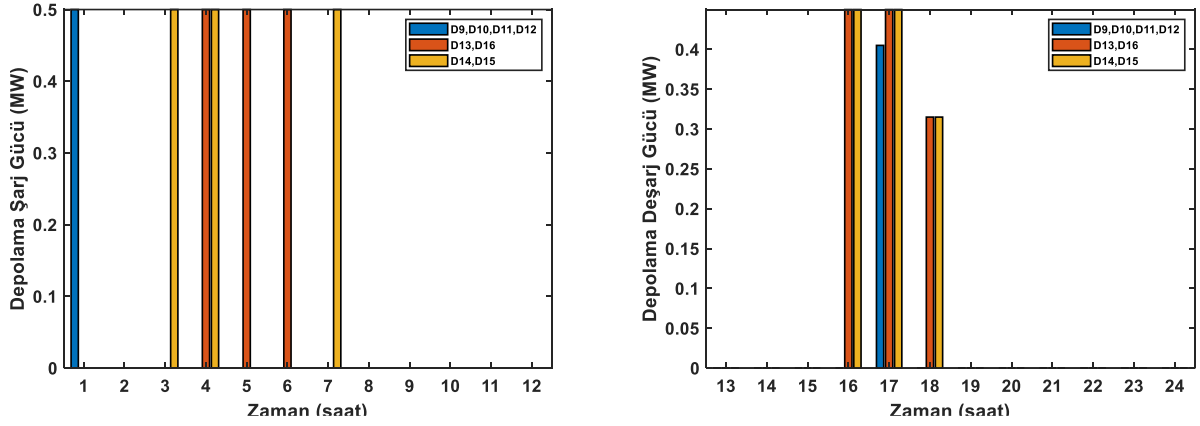
**Tablo 6.** Durum setleri altındaki durumlar için toplam işletme maliyetleri.

Depolama	Durum	İşletme Maliyeti (\$)	Ortalama İşletme Maliyeti (\$)
<b>Depolama Yok</b>	D1	29064.610	16242.540
	D2	27895.947	
	D3	27627.277	
	D4	29333.280	
	D5	4589.135	
	D6	3420.471	
	D7	3151.801	
	D8	4857.805	
<b>Depolama Var</b>	D9	28862.984	16040.620
	D10	27693.984	
	D11	27425.314	
	D12	29131.317	
	D13	4387.172	
	D14	3218.508	
	D15	2949.838	
	D16	4655.842	
<b>Depolama 2 Kat Var</b>	D17	27223.351	15838.615
	D18	28929.355	
	D19	2747.875	
	D20	4453.879	

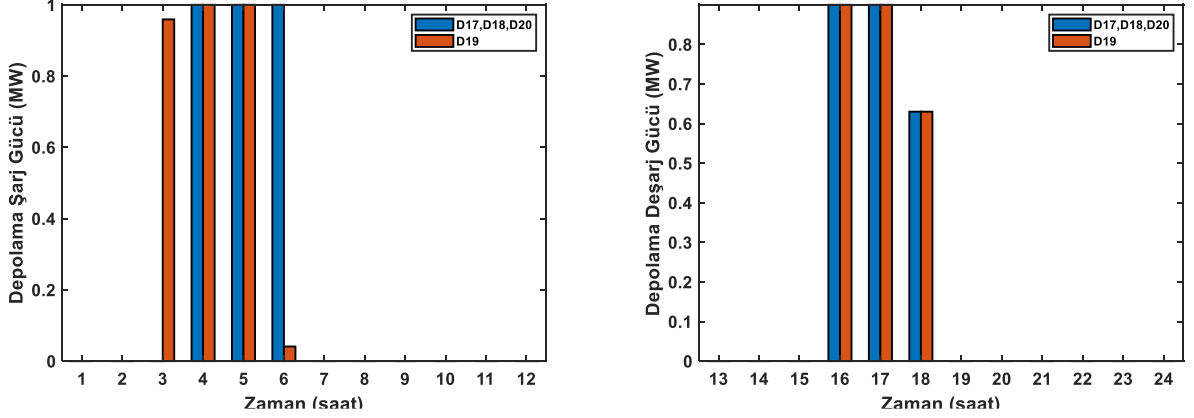
Şebekede enerji depolama kullanıldığında, önerilen işletim optimizasyonu sayesinde, piyasa fiyatının düşük olduğu saatlerde yenilenebilir kaynaklardan üretilen fazla enerji, şarj edilerek saklanabilmekte, piyasa fiyatının yüksek olduğu saatlerde gerekli olan enerji deşarj edilerek kullanılmakta ve fazlası yüksek fiyatlardan şebekeye

satılabilmektedir. Böylece hem şebekeden yüksek piyasa fiyatlarından satın alınan enerji miktarı azalmakta hem de daha düşük piyasa fiyatlarından enerji satın alınması sağlanmaktadır ki bu da toplam işletme maliyetini minimize etmede en etkin yollardan biri olarak kabul edilebilmektedir. Batarya enerji depolama sisteminin yatırım ya da işletim maliyeti ile ilgili olarak, bataryanın dağıtım sistemi operatörünün mülkiyetinde olduğu ve dağıtım sistemi operatörünün bunun işletimini kendi faydası için optimize ettiği varsayılmaktadır. Bu nedenle, depolama sistemi için herhangi bir fazladan maliyet düşünülmemiştir.

Çalışmada baz kapasitede kullanılan batarya enerji depolama cihazı üzerinde 24 saatlik zaman aralıklarında olmak üzere bir gün içerisindeki güçlerin (şarj ve deşarj güçleri) zamana göre değişim grafikleri Şekil 4'te, iki kat kapasitede kullanılan depolamanın güç değişimleri ise Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 4. Baz kapasitede depolama güç değişimleri.



Şekil 5. İki kat kapasitede depolama güç değişimleri.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, fider ölçeğinde aktif bir elektrik dağıtım şebekesinde işletme maliyetini en aza indiren; stokastik programlamaya dayalı optimal işletim yaklaşımı geliştirilmiştir. Yaklaşım, gün öncesinde planlanmış üretimlerin ve yüklerin konuşlandırılması ve gerçek zamanlı işletimde şebekenin çift yönlü güç akışına ilişkin süreçleri kapsamaktadır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları şebekede depolamanın olup olmadığı durumlar ve alt durumlar dahilinde, test baraları üzerinde uygulanmıştır. Edinilen sonuçlara göre aynı şebeke koşulları altında depolama bulunmadığında ve baz kapasitede bulunduğu hesaplanan günlük işletme maliyetleri ortalamaları arasında, günde 201.92 \$'lık fark görülmüştür. Bir gün için elde edilen bu rakam yıl bazlı hesaplandığında 73700 \$ seviyelerinde bir işletme maliyeti azaltımı söz konusu olmaktadır. Çalışma ile önerilen iki aşamalı yaklaşım ile işletme maliyetlerinin gözle görülür düzeylerde düşüşü sağladığı görülmüştür ki bu

durum çalışma ile önerilen yöntemin mevcut sistemlere uygulanmasının avantajını göstermektedir. Bulgular, yenilenebilir ve dağıtık üretim kaynaklarının entegre edildiği çift yönlü enerji akışına sahip elektrik dağıtım şebekesinde enerji depolama kullanımının optimal planlamasının, işletme maliyetlerini en aza indirmek için etkili bir araç olduğunu göstermiştir. Önerilen çerçevenin, minimum işletme maliyetleri ile optimum çizelgeleme için gerçek şebekelerde yürütülen gelecekteki çalışmalar için bir referans noktası olacağı öngörülmektedir.

### Teşekkür

F.A.F., fikir sahibi olup verilerin toplanmasını ve makale yazımını gerçekleştirmiştir. İ.K. çalışmanın tasarımını ve verilerin analizini gerçekleştirmiştir. Ö.F.K., verilerin analizi ve sonuçların yorumlanmasını gerçekleştirmiştir.

### Kaynaklar

- [1] S. Koochi-Fayegh and M. A. Rosen, "A review of energy storage types, applications and recent developments," *J. Energy Storage*, vol. 27, no. July 2019, p. 101047, 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101047.
- [2] E. D. M. SHURA, *Yenilenebilir Dağıtık Enerji Üretiminin Şebeke ve Piyasa Entegrasyonu*. 2021.
- [3] S. Seyyedeh Barhagh, M. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimal scheduling of electric vehicles and photovoltaic systems in residential complexes under real-time pricing mechanism," *J. Clean. Prod.*, vol. 246, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119041.
- [4] K. P. Kumar and B. Saravanan, "Day ahead scheduling of generation and storage in a microgrid considering demand Side management," *J. Energy Storage*, vol. 21, no. June 2018, pp. 78–86, 2019, doi: 10.1016/j.est.2018.11.010.
- [5] Y. Li, Z. Yang, G. Li, D. Zhao, and W. Tian, "Optimal Scheduling of an Isolated Microgrid with Battery Storage Considering Load and Renewable Generation Uncertainties," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1565–1575, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2840498.
- [6] L. Luo et al., "Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty," *J. Energy Storage*, vol. 28, no. August 2019, p. 101306, 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101306.
- [7] X. Zhang, Y. Son, and S. Choi, "Optimal Scheduling of Battery Energy Storage Systems and Demand Response for Distribution Systems with High Penetration of Renewable Energy Sources," *Energies*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/en15062212.
- [8] Y. Wang, J. Zhao, T. Zheng, K. Fan, and K. Zhang, "Optimal Planning of Integrated Energy System Considering Convertibility Index," *Front. Energy Res.*, vol. 10, no. April, pp. 1–17, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.855312.
- [9] W. S. Ho, S. Macchietto, J. S. Lim, H. Hashim, Z. A. Muis, and W. H. Liu, "Optimal scheduling of energy storage for renewable energy distributed energy generation system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1100–1107, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.097.
- [10] F. Avli Firiş, İ. Karadöl, M. Şekkeli, and Ö. F. Keçecioglu, "Optimal scheduling of active electricity distribution network at feeder scale under possible conditions and considering operating cost," *Electr. Eng.*, 2023, doi: 10.1007/s00202-023-01887-3.
- [11] A. Hadjian, "Kastamonu," *Secret Nation*, no. 2, pp. 545–556, 2019, doi: 10.5040/9781350987951.ch-016.
- [12] Z. Wang and J. Wang, "Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization into Microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 3139–3149, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2389753.
- [13] M. Di Somma, G. Graditi, E. Heydarian-Forushani, M. Shafie-khah, and P. Siano, "Stochastic optimal scheduling of distributed energy resources with renewables considering economic and environmental aspects," *Renew. Energy*, vol. 116, pp. 272–287, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.09.074.
- [14] U. Shahzad and S. Asgarpour, "Probabilistic Risk Assessment of an Active Distribution Network Using Monte Carlo Simulation Approach," *51st North Am. Power Symp. NAPS 2019*, 2019, doi: 10.1109/NAPS46351.2019.9000225.
- [15] E. Zio, M. Delfanti, L. Giorgi, V. Olivieri, and G. Sansavini, "Monte Carlo simulation-based probabilistic assessment of DG penetration in medium voltage distribution networks," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 852–860, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.08.004.
- [16] S. Conti and S. Raiti, "Probabilistic load flow using Monte Carlo techniques for distribution networks with photovoltaic generators," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 12, pp. 1473–1481, 2007, doi:

- 10.1016/j.solener.2007.02.007.
- [17] A. Izadi and A. mohammad Kimiagari, "Distribution network design under demand uncertainty using genetic algorithm and Monte Carlo simulation approach: a case study in pharmaceutical industry," *J. Ind. Eng. Int.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2014, doi: 10.1186/2251-712X-10-1.
- [18] K. Nara, A. Shiose, M. Kitagawa, and T. Ishihara, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution Systems Loss Minimum Re-Configuration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 3, pp. 1044–1051, 1992, doi: 10.1109/59.207317.
- [19] S. Stentz, "Improving weighted caseload studies in limited jurisdiction courts," *Justice Syst. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 79–385, 1988, doi: 10.1080/23277556.1989.10871109.
- [20] A. Khodaei, S. Bahramirad, and M. Shahidehpour, "Microgrid Planning Under Uncertainty," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2417–2425, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2361094.
- [21] Z. Liu, F. Wen, and G. Ledwich, "Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 1, pp. 102–110, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2223489.
- [22] S. Wen, H. Lan, Q. Fu, D. C. Yu, and L. Zhang, "Economic allocation for energy storage system considering wind power distribution," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 644–652, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2337936.
- [23] P. Siano and G. Mokryani, "Assessing wind turbines placement in a distribution market environment by using particle swarm optimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 3852–3864, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2273567.
- [24] A. Gholami, T. Shekari, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Microgrid Scheduling with Uncertainty: The Quest for Resilience," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 6, pp. 2849–2858, 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2598802.
- [25] K. Binder, *Monte-Carlo Methods*. 2005.
- [26] D. P. Kroese and R. Y. Rubinstein, "Monte Carlo methods," *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, vol. 4, no. 1, pp. 48–58, 2012, doi: 10.1002/wics.194.
- [27] S. Teimourzadeh, O. B. Tor, M. E. Cebeci, A. Bara, and S. V. Oprea, "A three-stage approach for resilience-constrained scheduling of networked microgrids," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 705–715, 2019, doi: 10.1007/s40565-019-0555-0.
- [28] F. S. Hillier, *Series Editor*. 2019.

## Güneş Enerjisi Santrallerinde YOLO Algoritmaları ile Hotspot Kusurlarının Tespiti

Sümeyye YANILMAZ<sup>1</sup>, Muammer TÜRKÖĞLU<sup>2</sup>, Muzaffer ASLAN<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> Fen Bilimleri Enstitüsü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

<sup>2</sup> Yazılım Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye

<sup>3</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

<sup>1</sup> sumeyye\_yanilmaz@hotmail.com, <sup>2</sup> muammerturkoglu@samsun.edu.tr, <sup>3</sup> muzafferaskan@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 21/06/2023;

Kabul/Accepted: 10/11/2023)

**Öz:** Güneş enerjisi santrallerindeki kusurların hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesi, fotovoltaik (PV) sistemlerinde verim kaybını azaltmak ve ömrünü uzatmak açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, güneş enerjisi santrallerindeki, PV modüllerdeki hotspot (sıcak nokta) tespiti için You Only Look Once (YOLO) algoritmalarının etkililiği ve avantajları incelenmiştir. YOLO algoritmaları, yüksek hızda çalışarak tek bir taramada görüntüdeki nesnelere tespit edebilme özelliği sayesinde büyük ölçekli santrallerde verimli bir şekilde kullanılabilir. Bu doğrultuda, YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7 ve YOLOv8 algoritmalarının performansları karşılaştırılmış ve en iyi sonuç veren model belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucuna göre, veri kümesinde kullanılan insansız hava aracı tarafından elde edilen 100 adet görüntünün %80'i eğitim kümesi %20'si ise test kümesi için kullanılarak YOLO algoritmaları karşılaştırmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, YOLOv8 algoritmasının %88.7 özgüllük, %80.5 duyarlılık ve %83.8 mAP değerleri ile diğer modellere göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Çalışmada kullanılan veri seti gerçek güneş panellerinden elde edilen görüntülerden oluşmuştur ve bu sayede çalışmanın sonuçları gerçek dünya senaryolarına uygun bir şekilde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, YOLO algoritmalarının güneş panellerindeki sıcak nokta kusurlarının tespiti için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir. Bu çalışma, güneş enerjisi santrallerinin daha verimli hale getirilmesi için nesne tespiti algoritmalarının kullanımının önemini vurgulamaktadır. Ayrıca, ilerideki çalışmalara yol gösteren ve literatüre katkı sağlayan bir çalışma olarak değerlendirilebilir.

**Anahtar kelimeler:** Güneş panelleri, Sıcak nokta tespiti, YOLO algoritması, Görüntü işleme.

### Detection of Hotspot Defects in Solar Power Plants with YOLO Algorithms

**Abstract:** The rapid and accurate detection of defects in solar energy plants is of great importance to reduce efficiency losses and extend the lifespan of photovoltaic systems. In this study, the effectiveness and advantages of You Only Look Once (YOLO) algorithms for hotspot detection in solar energy plants have been investigated. YOLO algorithms can be efficiently used in large-scale facilities due to their ability to detect objects in images in a single scan at high speeds. In this context, the performances of YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7, and YOLOv8 algorithms were compared, and the best-performing model was determined. According to the results of the experiments, 80% of the 100 images obtained by an unmanned aerial vehicle in the dataset were used for training, and the remaining 20% were used for testing the YOLO algorithms. The results indicated that the YOLOv8 algorithm outperformed other models with 88.7% specificity, 80.5% sensitivity, and 83.8% mean Average Precision (mAP) values. The dataset used in the study consisted of images obtained from real solar panels, ensuring that the results of the study were tested in accordance with real-world scenarios. The findings demonstrate that YOLO algorithms are an effective method for detecting hotspot defects in solar panels. This study highlights the importance of using object detection algorithms to make solar energy plants more efficient. Additionally, it can be considered as a guiding and contributing study to the literature, providing insights for future research.

**Key words:** Solar panels, Hotspot detection, YOLO algorithm, Image processing.

### 1. Giriş

Hızla artan nüfus ve gelişen teknolojiyle birlikte enerji üretimi ve tüketimi hayatın her alanında önemli hale gelmiştir. Ancak artan enerji talebini karşılamak için kullanılan kömür, petrol, doğalgaz gibi karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyon miktarı fazla olan fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan sera gazları atmosferde birikerek küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine de neden olmaktadır [1]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA), 2022 yılında yayınlanan raporuna göre, 2022'de CO<sub>2</sub> emisyon miktarı %0,9 artarak tüm zamanların en yüksek seviyesi olan 36,8 GT'a ulaşmıştır [2]. Bu artan karbondioksit emisyonları nedeniyle ülkeler yenilenebilir enerji kaynaklarına

\* Sorumlu yazar: [muzafferaskan@bingol.edu.tr](mailto:muzafferaskan@bingol.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0009-8389-5068, <sup>2</sup> 0000-0002-2377-4979, <sup>3</sup> 0000-0002-2418-9472

yönelmeye başlamıştır. IEA raporlarına göre, yenilenebilir enerji kapasitesi 2022 ile 2027 yılları arasında neredeyse 2.400 GW artarak Çin'in tüm kurulu güç kapasitesine eşit olması beklenmektedir [3].

Bu kapsamda güneş enerjisi sistemleri, hızla gelişen ve gelecekte önemli potansiyele sahip olan enerji üretim teknolojilerinden biridir [4]. Güneş enerjisi genellikle termal ve PV sistemler aracılığıyla üretilmektedir. PV sistemler, güvenilirlikleri, dayanıklılıkları ve sürdürülebilir enerji üretmeleri nedeniyle önemli güç üretim sistemleri arasında kabul edilmektedir [5, 6].

PV üretim tesislerindeki kurulum kapasitesi her yıl hızla artmaktadır [7]. Üreticiler, genellikle PV modüller için 25 yıllık performans garantisi vermektedir. PV sistemler ömrünün ilk 10 yılında nominal kapasitenin en az %90'ını ve sonraki 10-15 yılında yaklaşık %80 performans garantisi sağlayan PV modüllerinin %17,6'sında arızalar meydana gelmiştir [8]. Gerçek koşullar altında, PV sistemlerin performansı zamanla azaldığı görülmektedir. Su damlacıkları, kuş pislikleri, kısmi gölgeleme, salyangoz izleri, mikro çatlaklar, hücre kırılmaları ve aşırı ısınma gibi faktörler PV sistemlerinde sıcak nokta hatalarına yol açabilmektedir [9, 10]. Sıcak nokta, PV sistemlerde üretilen gücü azaltan ve hücre bozulmasını hızlandıran önemli sorunlarından biridir [11]. Ayrıca, erken müdahale edilmezse, arızalar komşu modüllere yayılarak PV dizilerinin tamamen arızalanmasına yol açabilmektedir [12].

PV sistemlerinde sıcak nokta hatalarının erken tespiti, verim kayıplarını azaltmak ve sistem ömrünü uzatmak için oldukça önemlidir. Bu sistemlerin, düzenli denetim ve bakımlarının yapılması, sıcak nokta kusurlarının zamanında tespit edilmesini sağlar. Bununla birlikte manuel denetimlerle sıcak nokta kusurlarının zamanında tespit edilememesi hem maddi kayıplara neden olmakta hem de panellerin enerji verimliliğini düşürmektedir. Bu nedenle, PV sistemlerde sıcak nokta kusurunun erken tespiti için termografi yöntemi tercih edilmektedir [13]. Bu yöntem, modülün lamine edilmeden önce ters polariteye sahip bir voltaj uygulanarak sıcak nokta ve üretim hatalarından kaynaklanan şöntlerin tespit edilmesini sağlayabilmektedir [14].

Ayrıca, literatürde farklı makine öğrenimi algoritmalarının sıcak nokta tespiti için kullanıldığı görülmektedir. Bu algoritmalar, elde edilen termal görüntülerdeki özellikleri analiz ederek panellerin sağlıklı, hatalı sıcak nokta veya hatasız olarak sınıflandırılmaktadır. Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi (DVM), karar ağacı (DT) ve k-en yakın komşu (KNN) gibi algoritmalar bu amaçla kullanılan yöntemler arasındadır.

Niazia ve diğ. (2019), PV modüllerde kategorize edilmiş sıcak nokta tespiti için Naive Bayes tabanlı sınıflandırma temelli yönlü gradyan histogram (HOG) özelliklerini kullanmışlardır. Sonuç olarak, FLIR termal kamera ile elde edilen 375 adet termal görüntüden oluşan veri setinde sıcak nokta kusurlarının tespitinde yaklaşık %94,1'lik doğruluğa ulaşılmıştır [10].

Ali ve diğ. (2020), PV panellerin sıcak nokta tespiti ve sınıflandırması için kızılötesi termografi tekniği kullanarak hibrit özelliklere dayalı bir DVM modeli geliştirmişlerdir. Özellikler olarak RGB, doku, HOG ve yerel ikili modelden (LBP) oluşan yeni bir hibrit özellik vektörü, bir veri füzyon yaklaşımı kullanılarak oluşturmuşlardır. PV panellerin elde edilen termal görüntülerini üç farklı sınıfa; sağlıklı, hatasız sıcak nokta ve hatalı olmak üzere sınıflandırmak için DVM'ye uyguladılar. Önerilen modelin ve hibrit özellik veri setinin üstünlüğünü doğrulamak için diskriminant analizi (QDA), Naive-Bayes, KNN, torbalama topluluğu (BE) makine öğrenimi algoritmalarının ve veri setlerinin karşılaştırılmasını yapmışlardır. Önerilen hibrit özellikler (veri seti III), önerilen DVM modelini kullanarak 315 PV termal örneğinden 305'ini doğru bir şekilde sınıflandırıldı. DVM ile önerilen hibrit özelliklerin, diğer makine öğrenme algoritmalarına göre daha az hesaplama karmaşıklığı ve depolama alanı ile %96,8 eğitim doğruluğu ve %92 test doğruluğu sonucuna ulaşılmıştır [7].

Chen ve diğ. (2020), güneş panellerinin termografik görüntülerinde sıcak nokta tespiti için RGB renk uzayından HSV uzayına dönüşümü içeren yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, bir termografik görüntü RGB renk uzayından HSV renk uzayına dönüştürülür ve güneş panellerinin tüm hücreleri H kanalına göre bölütlenir. Güneş panellerinin kenarları Canny kenar algılama algoritması kullanılarak çıkarılır. Güneş panellerinin hücreleri, çıkarılan kenarlara göre bölümlere ayrılır. B kanalındaki her bir bölümlenmiş hücrenin ortalama ve standart sapmasına dayalı bir SVM modeli eğitilir. Sonuç olarak, önerilen yöntemin güneş panelleri için sıcak nokta hatalarını tespit etmede etkili olduğunu, özellikle gri alandaki ortalama ve standart sapmanın ek özellikleriyle aşırı maruz kalmaya karşı sağlam olduğunu göstermektedir [11].

Ren ve diğ. (2020), PV sistemlerde derin öğrenme tabanlı sıcak nokta algılama sistem tasarımı geliştirmişlerdir. PV sıcak nokta tespiti için geliştirilmiş bir SSD (Single Shot Detection) algoritması tasarlamışlardır. SSD algoritmasındaki VGG-16 evrişimli sinir ağı yapısının yerine MobileNet ağını kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarda, 1500'ü sıcak nokta olan toplamda 2000 görüntüye sahip veri seti kullanılmıştır. Geliştirilmiş MobileNet-SSD algoritmasını YOLO ve SSD algoritması ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, geliştirilmiş MobileNet-SSD algoritması karşılaştırılan algoritmalara göre PV dizilerde Sıcak nokta algılama sisteminin, geleneksel YOLO ve SSD algoritmalarına kıyasla iyi derecede güvene, yüksek algılama hızına, yavaş gözden kaçan algılama oranına ve iyi sağlamlığa sahip olduğunu göstermektedir [15].

Dhimish (2021), PV güneş hücrelerindeki sıcak nokta hatalarının erken tespiti için en uygun makine öğrenme sınıflandırıcısı için DT, DVM, KNN ve diskriminant sınıflandırıcılar dahil olmak üzere dört farklı makine öğrenme sınıflandırıcı sonuçları karşılaştırmıştır. Ayrıca, en yüksek başarıma sahip sınıflandırıcıların karmaşıklık matrisi ve alıcı çalışma karakteristikleri (ROC) kullanılarak performansları açısından da karşılaştırılmıştır. Çalışmada, en yüksek %98 doğruluk ile DC sınıflandırıcı, en düşük tespit %84 ile karar ağacı sınıflandırıcıda sağladılar [6].

Ali ve diğ. (2021), renkli görüntü tanımlayıcıları ve makine öğrenme algoritmalarını kullanarak PV modüllerde erken sıcak nokta tespitini gerçekleştirmişlerdir. Önerilen sistemde sıcak nokta hatalarını belirlemek için termal kamera ile donatılmış bir insansız hava aracı (İHA) kullanılmıştır. Histogram tabanlı renk tanımlayıcıları, renk momenti ve değişmezleri ve ölçek ile değişmeyen özellik dönüşüm algoritmaları ile öznelik çıkarımını gerçekleştirdiler. Sınıflandırma için bu öznelikler Naive Bayes, DT, rastgele orman ve k-NN makine öğrenme algoritmalarına uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda, 375 görüntünün %80'nini eğitim ve %20'sini test için kullanılmıştır. Yapılan testler sonucunda k-NN + rgSIFT' in 71 x 71 piksellik bir bölge boyutuyla %98,7'nin doğruluk oranıyla diğer tüm görüntü tanımlayıcıları ve makine öğrenme kombinasyonlarından daha iyi doğruluk elde edilmiştir [16].

Sun ve diğ. (2022), PV panellerin sıcak nokta tespiti için YOLOv5 (AP-YOLOv5) ağınnın geliştirilmiş ankraj ve tahmin kafalarına dayalı olarak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Ayrıca, YOLOv5 ağınnın PV panellerin sıcak nokta hatalarında farklı ölçeklerde algılama hassasiyetini artırmak için, veri açıklama çerçevesinin uzunluk- genişlik oranını ve daha küçük ankrajlardan oluşan bir grubu kümelemek için K-means kümeleme algoritmasını da kullanmışlardır. PV panellerin sıcak nokta hatalarını morfolojik özelliklerine göre dairesel, doğrusal ve dizi olarak sınıflandırılmış toplamda 1000 adet görüntü kullanmışlardır. Çalışmalarında, tek aşamalı nesne algılama modelleriyle karşılaştırıldığında, önerilen ağınn ortalama kesinliğinin (mAP) %87,8, ortalama geri çağırma oranının %89,0 ve F1 puanının %88,9 doğruluk sonucuna ulaşmıştır [17].

Bu çalışmada, güneş panellerindeki sıcak nokta hatalarının tespiti için bölgesel tabanlı YOLO algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkıları şunlardır:

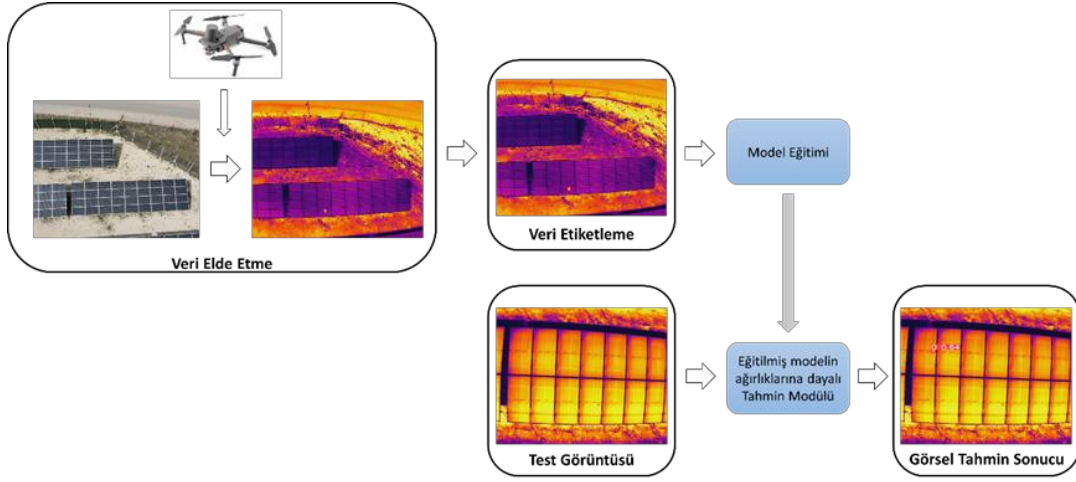
- Güneş panellerindeki sıcak nokta kusurlarının tespiti için YOLO algoritmalarının kullanımının etkinliği ve avantajları açıkça gösterilmiştir.
- Çalışmada kullanılan veri seti ve performans metrikleri diğer çalışmalarda da kullanılabilir ve karşılaştırmalar yapılabilir.
- Çalışmada, farklı YOLO algoritmalarının performansları karşılaştırılmış ve en iyi sonuç veren model belirlenmiştir.
- Bu çalışma, güneş enerjisi santrallerinin daha verimli hale getirilmesi için nesne tespiti algoritmalarının kullanımının önemi vurgulamaktadır.
- YOLO algoritmalarının performansını artırmak için farklı tekniklerin ve parametrelerin kullanımı gibi ilerideki çalışmalara yönelik öneriler sunulmaktadır.

Makalenin genel organizasyonu şu şekildedir: Giriş bölümünde, çalışmanın amacı ve önemi açıklanmaktadır. Ayrıca, güneş enerjisi santrallerindeki sıcak nokta kusurlarının tespiti için YOLO algoritmalarının kullanımının avantajları detaylandırıldı. Ek olarak bu bölümde, güneş panellerindeki kusurların tespiti için kullanılan diğer yöntemler ve nesne tespiti algoritmaları hakkında bilgi verilmektedir. Materyal ve yöntem bölümünde ise, kullanılan veri seti, YOLO algoritmalarının nasıl kullanıldığı ve performans değerlendirmesi için kullanılan metrikler detaylandırıldı. YOLO algoritmalarının performansı ve karşılaştırılması hakkında ayrıntılı bilgi Sonuç bölümünde verilmiştir. Tartışma bölümünde, çalışmanın sonuçları ve YOLO algoritmalarının güneş panellerindeki kusurların tespitindeki avantajları hakkında tartışılır. Ayrıca, çalışmanın sınırlamaları ve ilerideki çalışmalara yönelik öneriler de sunulur. Çalışmanın önemi ve YOLO algoritmalarının güneş panellerindeki sıcak nokta kusurlarının tespiti için kullanımının avantajları Sonuç bölümünde özetlenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, güneş enerjisi santrallerindeki sıcak nokta kusurlarını tespit etmek için YOLO tabanlı bir derin öğrenme modeli önerilmektedir. Veri seti, güneş tarlasındaki PV panellerinden toplanan görüntülerden oluşmaktadır ve bu bakımdan çalışmanın sonuçları gerçek dünya senaryolarına uygun bir şekilde test edilmiş ve YOLO algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, farklı YOLO algoritmalarının ve farklı parametrelerin kullanımının, sıcak nokta kusurlarının tespiti için etkili olup olmadığını belirlemek için tasarlanmıştır. Önerilen çalışmanın genel diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.

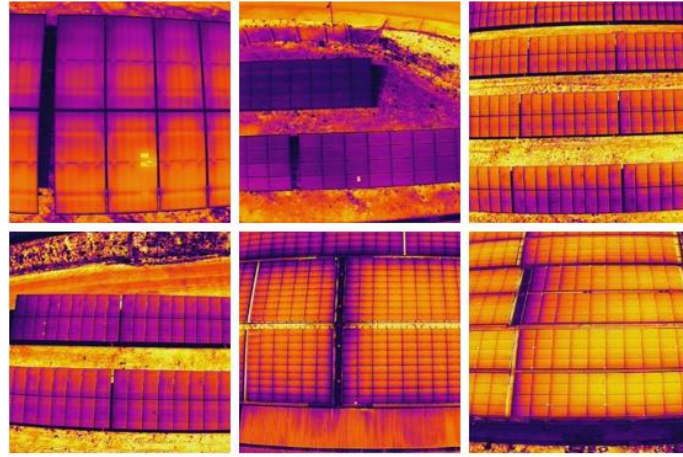
Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan veri seti, deney tasarımı, parametreler ve performans metrikleri ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Ayrıca, deneysel çalışmalardaki her bir YOLO modeli detaylandırılmıştır.



Şekil 1. Önerilen çalışmanın genel diyagramı.

## 2.1. Veri kümesi

Bu çalışmada, güneş paneli kusurlarının tespiti için özgün bir veri seti oluşturuldu. Bu veri seti, gerçek dünya koşullarında çekilmiş yüksek çözünürlüklü güneş paneli görüntülerinden oluşmaktadır. Veri seti, farklı güneş paneli türlerini içermektedir. Veri seti, toplamda 100 güneş paneli görüntüsünden oluşmaktadır. Her bir görüntü, ışık koşullarının ve çevresel faktörlerin değişebileceği gerçek dünya senaryolarını yansıtmaktadır. Görüntüler farklı açılardan çekilmiş ve farklı çözünürlüklere sahiptirler. Her görüntü bir veya daha fazla sıcak nokta kusurları içermektedir. Kusurlar, farklı büyüklükleri, şekillere ve konumlara sahiptir. Veri setindeki bazı örnek görüntüler Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Veri kümesine ait örnek görüntüler.

Oluşturulan özgün veri seti, <https://www.makesense.ai> programı kullanılarak etiketleme işlemi gerçekleştirildi. Her görüntüye ait etiketler, güneş panelindeki kusurların konumlarını ve sınıflarını içermektedir. Bu etiketler, uzman gözlemciler tarafından manuel olarak oluşturulmuştur ve doğrulukları kontrol edilmiştir.

Veri seti, deneysel çalışmalarda önerilen yöntem doğruluğunu ve hassasiyetini ölçmek için eğitim ve test veri kümesi olarak bölünmüştür. Eğitim veri seti, toplam veri setinin %80'ini oluştururken, geri kalan %20'lik kısım test veri seti olarak ayrılmıştır. Ayrıca, eğitim veri setini çeşitlendirmek ve algoritmanın daha genelleşici olmasını sağlamak amacıyla yatay ve dikey dönüşüm, parlaklık değişimi ve görüntü döndürme gibi veri artırma yöntemleri



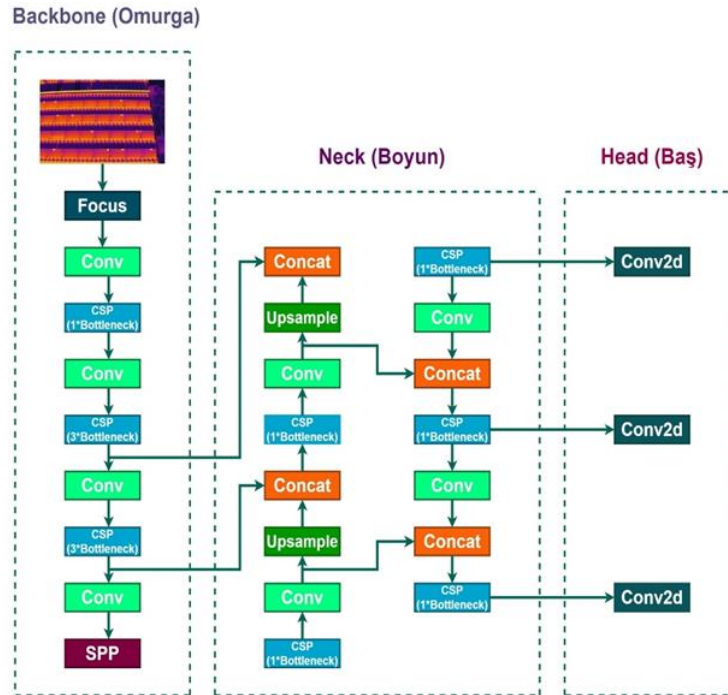
kullanılmıştır. Ham veri setindeki 100 görüntü, veri artırma teknikleri kullanılarak toplamda 240 görüntü elde edilmiştir.

## 2.2. YOLO algoritması

YOLO, sınırlayıcı kutuları ve sınıf olasılıklarını tahmin etmek için tek bir sinir ağını kullanan, GoogLeNet'ten ilham alan CNN tabanlı bir derin öğrenme algoritmasıdır [18, 19]. YOLO modeli, tek bir ağ yapısında nesnelere algılama, sınıflandırma ve tek aşamalı dedektör olarak çalışabilmektedir [20]. Ayrıca, nesnelere sınıfını (class) ve konumunu (bounding box) aynı anda tespit edebilir. YOLO, önce girdi görüntüsünü bir dizi konvolüsyon ve örnekleme katmanından geçirir. Ardından, nesne konumlarını tahmin etmek için bir son katman kullanır. Bu son katmanda, önceki katmanlardan gelen özellik haritaları, nesnelere konumları ve sınıfları hakkında bilgi içeren tespit haritalarına dönüştürülür. Bu tespit haritaları daha sonra sınıflandırma işlemiyle birleştirilir ve görüntüdeki nesnelere türleri belirlenir. Tek bir ağ yapısı içerisinde bulunan tüm algılama hattı, diğer sinir ağı mimarilerinin çoğundan daha yüksek doğrudan algılama performansı sunar [18]. Bu model genellikle tek aşamalı modellere göre genellikle daha basit, hızlı ve güvenilir doğruluk sonuçları sunmaktadır [20]. YOLO mimarisi, farklı boyutlarda ve farklı hızlarla çalışan birkaç farklı modeli mevcuttur. Bu modeller sırasıyla YOLO, YOLOv2, YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7, YOLOv8, YOLOX ve YOLOR şeklinde sıralanmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, YOLOv3, YOLOv4, YOLOv5 modellerinin en yaygın kullanılan modeller olduğu gözlemlenmiştir [20]. Bu çalışmada da YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7, YOLOv8 modellerinin kullanılmaktadır.

### 2.2.1. YOLOv5 algoritması

YOLOv5 algoritması Joseph Redmon tarafından geliştirilen YOLO algoritmasının devamı niteliğindedir. YOLOv5 mimarisi, Phil Wang, Glenn Jocher ve Alexey Bochkovskiy gibi araştırmacılardan oluşan bir ekip tarafından yönetilen Ultralytics adlı bir yapay zekâ araştırma şirketi tarafından geliştirilmiştir. Bu model, 2020 yılında tek aşamalı hedef tanıma algoritması olarak piyasaya sürülmüştür ve açık kaynaklı bir yazılım olarak Github'da yayınlanmıştır. YOLOv5 algoritması, PyTorch kütüphanesi üzerinde yeni bir eğitim ortamı altında derlenerek geliştirilmiştir [19]. Ayrıca, bu ağ modelinin önceki sürümlere kıyasla algılama doğruluğu ve hızı oldukça yüksektir [18]. YOLOv5 model mimarisi Şekil 3'te verilmiştir.

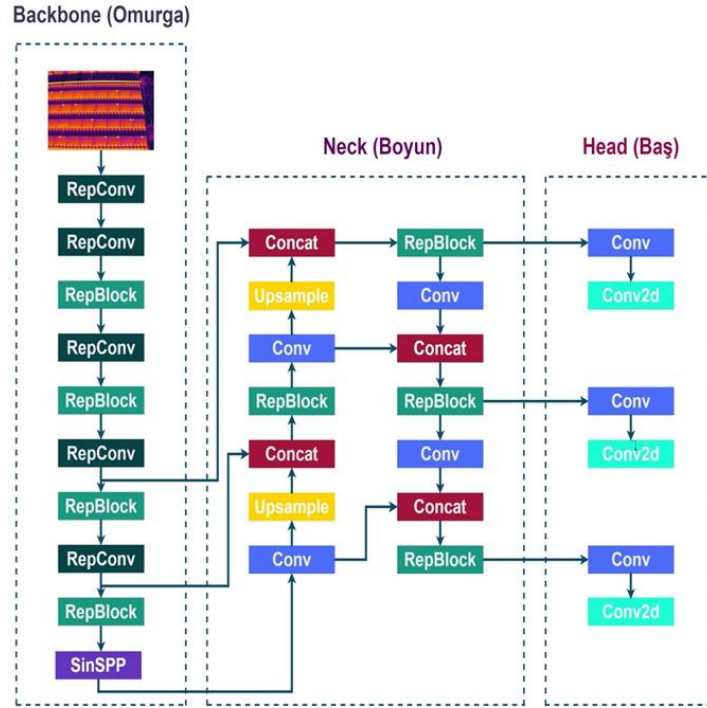


Şekil 3. YOLOv5 model mimarisi [19].

YOLOv5 algoritması, boyut ve model parametrelerinin miktarına göre artan dört farklı ağ modeli mimarisine ayrılabilir. Bunlar; YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l ve YOLOv5x mimarileridir. Bu mimariler arasında YOLOv5s ağı en hızlı hesaplama hızına ve en düşük ortalama kesinlik özelliğine sahiptir. YOLOv5x ağı ise YOLOv5s ağının tam tersi özelliğine sahiptir [19]. YOLOv5 ağ mimarisi backbone (omurga), neck (boyun) ve head (baş) kısmı olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Omurga üzerindeki ESA katmanında, giriş görüntüsünün farklı ölçeklerdeki öznitelikleri çıkarılmaktadır. Boyun kısmı, omurgadan aldığı görüntü özelliklerini kullanarak farklı görüntü taneciklerinde toplar ve özellik haritası oluşturur ve bunları tahmin katmanına taşır. Baş kısmında ise, sınırlayıcı kutular ve tahmin edilen kategoriler oluşturmak için görüntü özelliklerini tahmin eder [20, 21].

### 2.2.2. YOLOv6 algoritması

YOLOv6 modeli, 2022 yılında Meituan Görsel Zekâ Departmanı tarafından çoklu nesnelere üzerinde iyi algılama performansı sonuçları ve yüksek çıkarım hızı ile önerilmiştir [22]. YOLO mimarisi temelinde inşa edilmiş ve daha yüksek doğruluk, daha hızlı performans ve daha fazla ölçeklenebilirlik özellikleri sağlamak üzere tasarlanmıştır. YOLOv6 modeli, Python programlama dili kullanılarak PyTorch kütüphanesi ile yazılmıştır [18]. Ayrıca, omurga, boyun ve baş yapısını donanıma göre yeniden tasarlayarak çeşitli iyileştirmeler ve yeni yöntemler sunmuştur [23]. Şekil 4'de model mimarisi verilen YOLOv6 modeli, önceki YOLO mimarilerinden daha az parametre kullanarak daha yüksek doğruluk elde etmek için EfficientRep tabanlı yeni bir omurga tasarlanmıştır. Boyun bölümü için, değerlendirme sonuçları ile nesne algılama hızı arasında iyi bir denge sağlamak için Rep-PAN uygulamıştır [22]. Boyun kısmında, önceki YOLO modellerinde kullanılan 3x3 konvolüsyon katmanları yerine, 1x1 ve 3x3 konvolüsyon katmanlarından oluşan bir yapı kullanılmıştır. Ayrıca Global Average Pooling (GAP) işlemi yerine, Spatial Pyramid Pooling (SPP) işlemi kullanılmıştır [23].

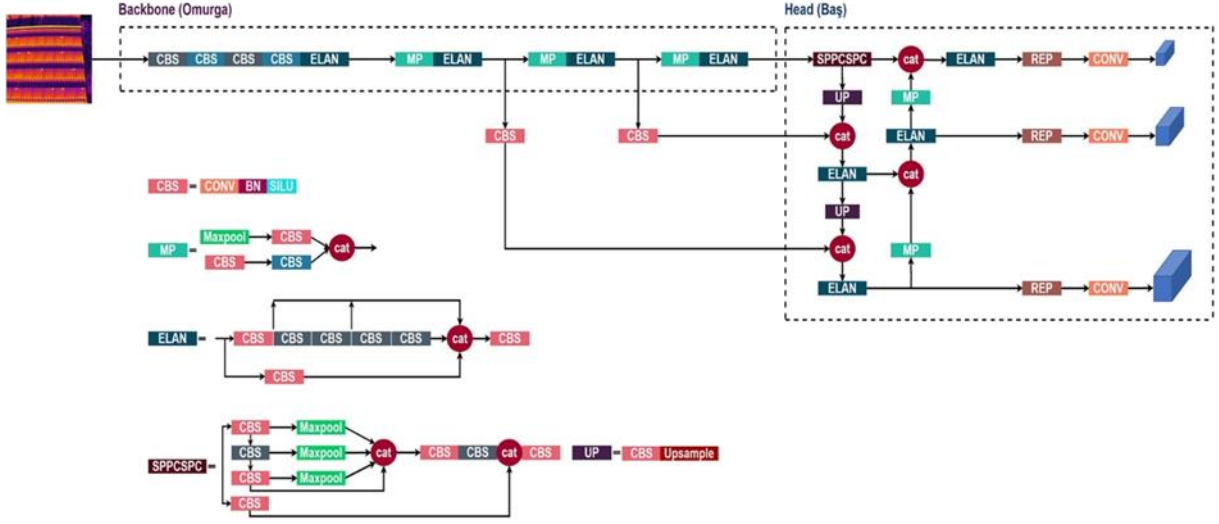


Şekil 4. YOLOv6 model mimarisi [23].

### 2.2.3. YOLOv7 algoritması

YOLOv7 algoritması, OpenCV AI Kit (OAK) tarafından geliştirilen bir sürümdür ve ilk olarak 2022 yılının temmuz ayında piyasaya sürülmüştür [24]. YOLO serisi algoritması içinden geliştirilmiş algılama hızı en hızlı ve en doğru gerçek zamanlı nesne dedektörü olduğu iddia ediliyor [25]. YOLOv7 uçtan uca gerçek zamanlı YOLOv5'e benzer bir yapıya sahiptir. Ancak YOLOv7 de evrişimli katmanlar kullanır ve bu da YOLOv7'yi

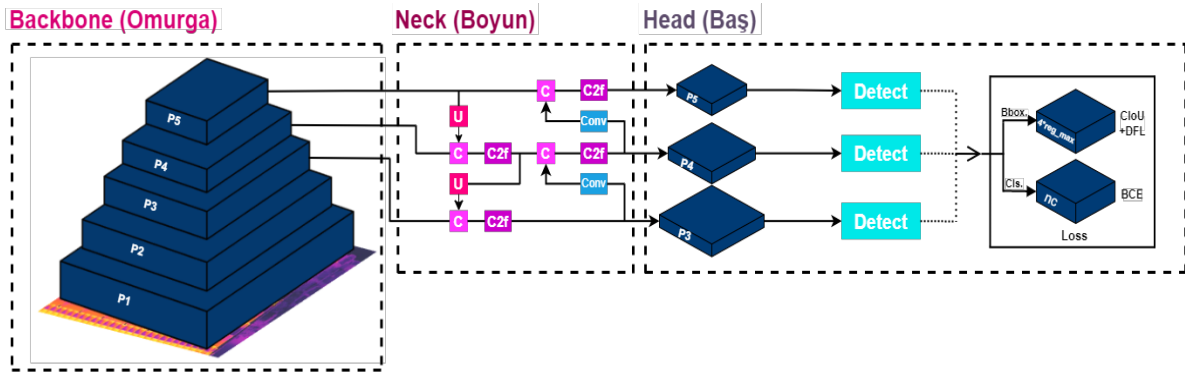
evrişimli bir ağ yapar [26]. YOLOv7 algoritmasının derin öğrenme çerçevesi, PyTorch derin öğrenme çerçevesi kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca derin öğrenme modelinin oluşturulması ve eğitilmesi için TensorFlow derin öğrenme çerçevesinde kullanılabilir. PyTorch çerçeve algoritması akademisyenlerin araştırmalarında, TensorFlow çerçeve algoritması ise mühendislerin uygulama geliştirmesinde elverişlidir [26]. YOLOv7 ağ mimarisi omurga, boyun ve baş kısmı olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. YOLOv7 algoritmasının ağ modelinin omurga ağı temel olarak evrişim, ELAN modülü, MPCConv modülü ve SPPCSPC modülünden oluşur [27]. YOLOv7 model mimarisi Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. YOLOv7 model mimarisi [27]

#### 2.2.4. YOLOv8 algoritması

YOLOv8, Ocak 2023’te YOLOv5’i geliştiren Ultralytics şirketi tarafından piyasaya sürüldü [27]. YOLOv8 algoritması, yüksek doğruluk ve hız elde ettiği kanıtlanmış son teknoloji bir nesne algılama modelidir [28, 29]. Şekil 6’da model mimarisi verilen YOLOv8 algoritmasının ağ mimarisi omurga, boyun ve baş kısmı olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır.



Şekil 6. YOLOv8 model mimarisi [30].

YOLOv8 algoritması yeni bir mimariye, iyileştirilmiş evrişimli katmanlara omurga ve daha gelişmiş bir algılama kafasına sahiptir [27]. YOLOv8 algoritması bir görüntüyü daha küçük bölgelerden oluşan bir ızgaraya bölerek her nesne için bir sınırlayıcı kutu ve sınıf olasılıkları tahmin ederek çalışır [28]. YOLOv8 algoritması, özellik çıkarma sürecini iyileştirmek için YOLOv7 ağından daha hızlı ve daha hassas olan Darknet-53 omurga

ağını kullanır. Darknet-53, 53 katmanlı evrişimli bir sinir ağıdır ve evrişimsel ağı nedeniyle önceki sürümlerden daha etkilidir [28-30]. YOLOv8 algoritmasının önceki YOLO sürümlerine göre en önemli iyileştirmelerden biri, eğitim sürecinde farklı konfigürasyonlara sahip birden fazla modelin kullanılmasını içeren Pseudo Supervision (PS) adlı bir tekniği içermesidir. YOLOv8 algoritması, nesne algılamanın doğruluğunu ve sağlamlığını artırmak için DarkNet-53, PS ve YOLOv4 mimarisini birleştirir. YOLOv8 mimarisi boyut ve model parametrelerinin miktarına göre artan beş ağ modeli mimarisine ayrılabilir. Bunlar; YOLOv8n-seg, YOLOv8s-seg, YOLOv8m-seg, YOLOv8l-seg ve YOLOv8x-seg mimarileridir [29].

### 3. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçlar

Kapsamlı gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, colab ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, nesne tespiti ve sınıflandırma alanında oldukça popüler olan YOLO algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın YOLOv5, YOLOv6, YOLOv7 ve YOLOv8 modelleri, güneş panellerindeki sıcak nokta kusur tespiti için adapte edilmiştir. Bu deneysel çalışmalarda, insansız hava aracı ile elde edilen 100 görüntü kullanılmıştır. Bu veri kümesinin %80 eğitim kümesi olarak kullanılırken, test kümesi için ise %20'si kullanılmıştır. Ayrıca, eğitim kümesi için yatay ve dikey dönüşüm, parlaklık değişimi ve görüntü döndürme gibi veri artırma teknikleri kullanılarak görüntü sayısı 240'a çıkartılmıştır. Bu sayede, daha iyi eğitim gerçekleştirilmesi ve bu sayede test performansının artırılması amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda, YOLO algoritmalarının performansını değerlendirmek için Duyarlılık (Duy), Özgüllük (Özg) ve Ortalama Duyarlılık (mAP) değerleri kullanılmıştır. Bu değerler ile ilgili matematiksel formüller Denklem (1-3)'de verilmiştir.

$$\text{Özg} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$\text{Duy} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

$$\text{mAP} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n AP_k \quad (3)$$

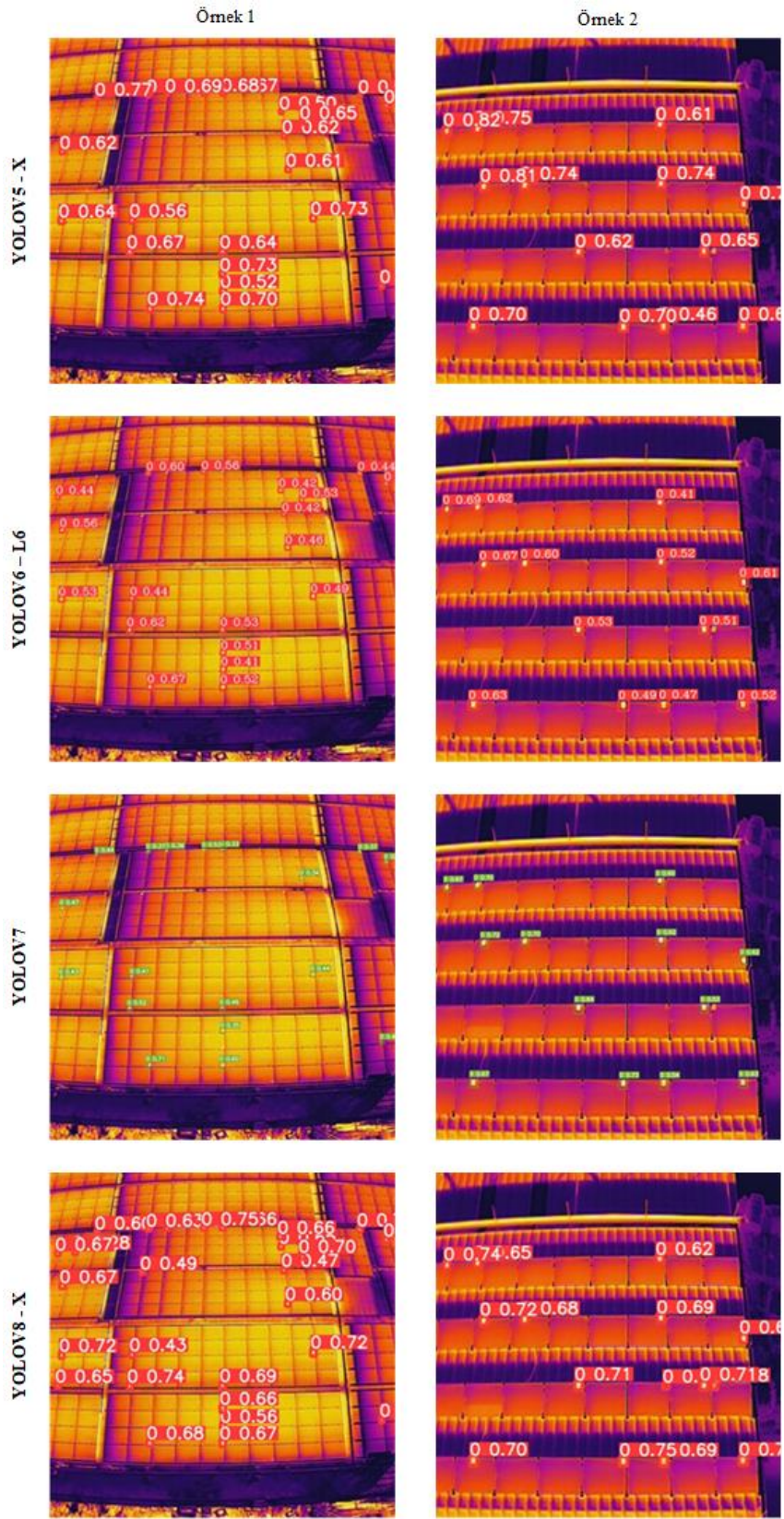
Burada TP karmaşıklık matrisindeki doğru pozitiflerin, FP hatalı pozitiflerin ve FN hatalı negatiflerin sayılarını göstermektedir.

Güneş panellerindeki sıcak nokta kusur tespiti için adapte edilen YOLO algoritmalarının eğitim aşamasında, eğitim tur sayısı (epoch) 100, parti boyutu (batch size) 16, öğrenme katsayısı 0.0001 ve optimizasyon algoritması Stochastic Gradient Descent (SGD) olarak belirlenmiştir. Bu deneysel çalışma sonuçları performans değerlendirme ölçütlerine göre Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** YOLO modellerinin performansları (%)

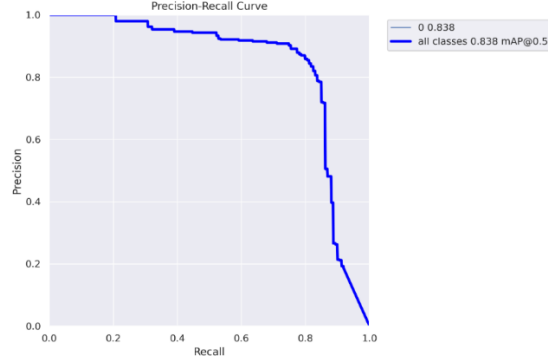
Model	Versiyon	Özgüllük	Duyarlılık	mAP@.5
YOLOV5	X	62,60	53,50	52,90
	X6	87,40	65,30	75,20
YOLOV6	M	-	-	59,98
	L6	-	-	67,46
YOLOV7	X	72,54	69,77	68,79
	N	80,20	76,30	79,00
YOLOV8	M	87,30	73,50	78,50
	X	88,70	80,50	83,80

Tablo 1'de, YOLO algoritmasına dayalı YOLOV5, YOLOV6, YOLOV7 ve YOLOV8 modelleri ile bu modellere ait versiyonlarının performans sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre, bu modeller arasından en iyi performans, YOLOV8x modeli ile %88.7 özgüllük, %80.5 duyarlılık ve %83.8 mAP değerleri elde edilmiştir. Diğer yandan, en iyi ikinci performans ise YOLOV5x modeli üretmiştir. Ayrıca, tüm YOLO modellerinin sonuçları incelendiğinde, tümünde en geniş kapsamlı versiyonları yüksek performans göstermiştir. Tablo 1'de en iyi performansa sahip YOLO modellerinin görsel sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.



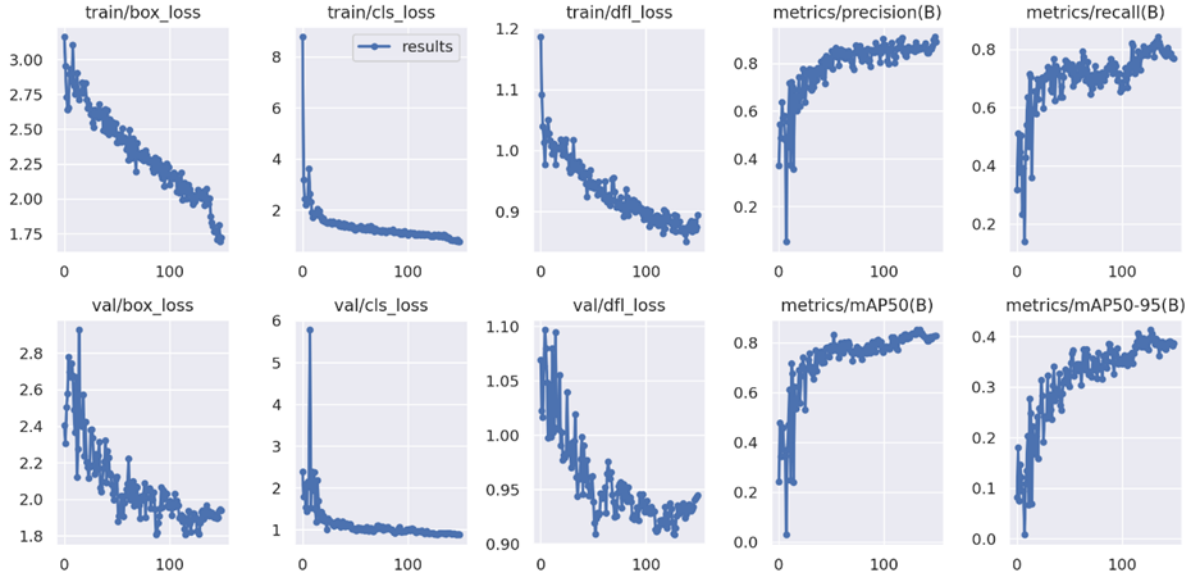
Şekil 7. YOLO modellerinin görsel tahmin sonuçları.

Şekil 7'den anlaşılacağı üzere, en iyi performansa sahip YOLOv8x modelinin, hemen hemen tüm sıcak nokta hatalarını doğru tespit etmiştir. Ayrıca Şekil 8'de verilen özgüllük-duyarlık eğrisi de bu başarıyı ortaya koymaktadır.



Şekil 8. YOLOv8 modelin özgüllük-duyarlık eğrisi

Şekil 7'deki veriler yakından incelendiğinde, tespit sonuçları 0 ile %75 arasında bir değer dağılımı sergilemektedir. Bu sonuçlar, modelin tek bir sınıfı (var/yok) tespit etme görevini gerçekleştirdiğini göstermektedir. Bu değerlendirme, modelin güneş panellerini başarılı bir şekilde tespit etme yeteneğini yansıtmaktadır. Ayrıca, %50'nin üzerindeki tespit sonuçları, modelin görevini yerine getirdiğini ve güneş panellerini doğru bir şekilde tanımladığını göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar, modelin Sıcak nokta Kusurlarının Tespiti konusundaki başarı ve güvenilirliğini vurgulamaktadır. Diğer yandan, bu modelin eğitim (train) ve kayıp (loss) grafikleri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. YOLOv8 modelinin eğitim/kayıp grafikleri.

Şekil 8'de sunulan grafiklerden anlaşılacağı üzere, modelin doğruluğunu artırma ve kaybı azaltma yönünde olumlu bir eğilim gözlenmektedir. Grafikleri incelediğimizde, eğitim sürecinin başlangıcından itibaren modelin hızla öğrenmeye başladığını ve bu öğrenmenin 100 iterasyon sonrasında yavaş bir şekilde öğrenmeye devam ettiği görülmektedir. Buna ek olarak, grafikler aynı zamanda modelin öğrenme hızının başlangıçta daha yüksek olduğunu ve zamanla yavaşladığını işaret etmektedir.

Deneysel çalışmaların kapsamında, modelimizin performansını çeşitli açılardan değerlendirmek için iki farklı yaklaşım benimsendi. İlk olarak, veri setini %80 eğitim ve %20 test olarak bölerek, modelin bu bölünmüş veri seti üzerindeki performansı incelendi. Bu yaklaşım, modelin temel performansını belirlememizde önemli bir rol oynadı. İkinci olarak, daha fazla güvenilirlik sağlamak amacıyla 10 kat çapraz doğrulama yöntemini kullanıldı. Her bir çapraz doğrulama katmanı, veri setini 10 eşit parçaya böldü ve her bir parça sırayla test verisi olarak kullanıldı, geri kalanlar ise eğitim verisi olarak kullanılmıştır. Bu yöntem, modelin performansının varyasyonunu daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmemize olanak sağladı. YOLOv8 algoritmasının performansını değerlendirdiğimizde elde ettiğimiz sonuçlar oldukça tatmin ediciydi. Bu model, güneş paneli tespiti görevinde %79 özgüllük, %78 duyarlılık ve %81 mAP gibi yüksek performans değerleri üretti. Bu sonuçlar, YOLOv8 algoritmasının güneş paneli kusurlarını etkili bir şekilde tespit edebildiğini ve güvenilir sonuçlar üretebildiğini açıkça gösteriyor. Bu başarı, güneş enerjisi santrallerindeki Sıcak nokta kusurlarının tespiti konusundaki potansiyel uygulamaları daha da vurguluyor.

#### 4. Sonuç

Bu çalışma, güneş panellerindeki sıcak nokta kusur tespiti için YOLO tabanlı bir derin öğrenme modeli önerilmektedir. YOLO algoritmaları, tek bir seferde görüntüdeki nesnelere tespit edebilme konusunda insan gözünden daha hızlı ve doğru sonuçlar elde edebilme yeteneğine sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, güneş enerji santralının verimliliğini arttırmak açısından önemli bir rol oynayabilir.

Sonuç olarak, bu çalışmada güneş panellerindeki sıcak nokta tespiti için YOLO algoritmalarını kullanılabilirliği ve performansı hakkında önemli bir bilgi sağlamaktadır. Deneysel çalışma kapsamında, orijinal olarak kaydedilmiş etiketlenmiş güneş paneli görüntüleri kullanılarak YOLO algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda YOLOv8 algoritmasının %88.7 özgüllük, %80.5 duyarlılık ve %83.8 mAP değerleri ile diğer modellere göre daha iyi bir sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, en iyi ikinci performans ise YOLOv5 modeli ile üretilmiştir. YOLOv5 ve YOLOv8 algoritmalarının, güneş enerjisi santrallerindeki kusurların tespiti için etkili bir araç olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar, güneş enerjisi santralleri için YOLO algoritmalarının kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Güneş panellerindeki sıcak nokta kusurlarının tespiti, sadece güç verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda güvenliği de sağlar. Kusurlu panellerin erken tespiti, yangın ve diğer tehlikeli durumların önlenmesine yardımcı olur. Ayrıca, güneş panellerindeki sıcak nokta kusur tespiti için YOLO algoritmalarının kullanımı, güç verimliliği ve güvenliği artırmada önemli bir araçtır. YOLOv5 ve YOLOv8 algoritmalarının yüksek doğruluk oranları, güneş enerjisi santrallerindeki kusurların hızlı ve doğru bir şekilde tespit edilmesine yardımcı olur. Bu çalışma, güneş enerjisi santrallerindeki bakım ve güvenlik uygulamalarının geliştirilmesinde faydalı olabilir.

Gelecek çalışmalarda, SSD ve Faster R-CNN gibi farklı nesne tespiti algoritmaları kullanılarak güneş panellerindeki kusurların tespiti için en iyi algoritmanın belirlenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada sunulan en iyi performansa sahip YOLO algoritması, uzaktan algılama teknikleri ile entegre edilerek, güneş panellerindeki kusurların tespiti için daha kapsamlı bir çözüm için odaklanılacaktır.

#### Teşekkür

Veri setinin oluşturulması sürecindeki desteklerinden dolayı Sines Enerjiye teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- [1] Yılmaz F, Ozturk M, Selbas R. Investigation of the thermodynamic analysis of solar Energy-Based multi-generation plant for sustainable multi-generation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022; 53: 102461.
- [2] International Energy Agency (IEA). CO2 Emissions in 2022. IEA, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022> (Erişim tarihi: Mayıs 2023)
- [3] International Energy Agency (IEA). Renewables 2022: Analysis and Forecast to 2027. IEA, Paris, France. <https://www.iea.org/reports/renewables-2022> (Erişim tarihi: Mayıs 2023)
- [4] Taşkın O. Kusurlu güneş panelinde (PV) verimlerin ölçülmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2019; 24(1): 289-298.
- [5] Açıköz H, Korkmaz D. Elektrolüminesans görüntülerde arızalı fotovoltaik panel hücrelerin evrişimli sinir ağı ile otomatik sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2022; 34(2): 589-600.
- [6] Dhimish M. Defining the best-fit machine learning classifier to early diagnose photovoltaic solar cells hot-spots. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021; 25, 100980.

- [7] Ali M. U. Khan H. F. Masud M. Kallu K. D. Zafar A. A machine learning framework to identify the hotspot in photovoltaic module using infrared thermography. *Solar Energy*. 2020; 208: 643-651.
- [8] Goudelis G. Lazaridis P. I. Dhimish M. A review of models for photovoltaic crack and hotspot prediction. *Energies*. 2022; 15(12): 4303.
- [9] Mustafa R. J. Gomaa M. R. Al-Dhaifallah M. Rezk H. Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems. *Sustainability*. 2020; 12(2): 608.
- [10] Niazi K. A. K. Akhtar W. Khan H. A. Yang Y. Athar S. Hotspot diagnosis for solar photovoltaic modules using a Naive Bayes classifier. *Solar Energy*. 2019; 190, 34-43.
- [11] Chen J. Li Y. Ling Q. (2020, August). Hot-Spot Detection for Thermographic Images of Solar Panels. In 2020 Chinese Control and Decision Conference (CCDC); 22-24 August 2020; Hefei, China: IEEE pp. 4651-4655.
- [12] Prajapati N. Raj, A. Aiyar R. Paraye M. Detection and Identification of faults in a PV Module using CNN-based Algorithm. *International Conference for Emerging Technology (INCET)*; 27-29 May 2022; Belgaum, India: IEEE pp. 1-5.
- [13] Afifah A. N. N. Suyuti A. (2020, December). Hotspot detection in photovoltaic module using Otsu thresholding method. In 2020 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat); 17-18 December 2020; Batam, Indonesia: IEEE. pp. 408-412.
- [14] Cipriani G. Boscaino V. Di Dio V. Cardona F. Zizzo G. Di Caro S. (2019, June). Application of thermographic techniques for the detection of failures on photovoltaic modules. In 2019 IEEE international conference on environment and electrical; 11-14 June 2019; Genova, Italy: IEEE. pp. 1-5
- [15] Ren Y. Yu Y. Li J. Zhang W. Design of photovoltaic hotspot detection system based on deep learning. The 2020 3rd International Conference on Computer Information Science and Artificial Intelligence (CISAI); 25-27 September 2020; Inner Mongolia, China: In *Journal of Physics: Conference Series* 1693(1) pp. 012075)
- [16] Ali M. U. Saleem S. Masood H. Kallu K. D. Masud M. Alvi M. J. Zafar A. Early hotspot detection in photovoltaic modules using color image descriptors: An infrared thermography study. *International Journal of Energy Research*. 2022;46(2):774-785.
- [17] Sun T. Xing H. Cao S. Zhang Y. Fan S. Liu P. A novel detection method for hot spots of photovoltaic (PV) panels using improved anchors and prediction heads of YOLOv5 network. *Energy Reports* 2022; 8: 1219-1229
- [18] Sevi M. Aydın İ. Akın E. YOLOv5 ile Topluluk Öğrenmesine Dayalı Olarak Ray Yüzeyindeki Kusurların Tespiti. *Demiryolu Mühendisliği* 2023; 17: 115-132.
- [19] Kıvrak O. Gürbüz M.Z. Performance Comparison of YOLOv3, YOLOv4 and YOLOv5 algorithms: A Case Study for Poultry Recognition. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2022; 38: 392-397.
- [20] Ağdaş M.T. Gülseçen Ş. Güvenlik Kameralarında Otomatik Silah ve Bıçak Tespit Sistemi: Karşılaştırmalı YOLO Modelleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2022; 41: 16-22.
- [21] Chen Z. Wu R. Lin Y. Li C. Chen S. Yuan Z. Zou X. (2022). Plant disease recognition model based on improved YOLOv5. *Agronomy* 2022; 12(2): 365
- [22] Azizah A. N. Fatichah C. Tajweed-YOLO: Object Detection Method for Tajweed by Applying HSV Color Model Augmentation on Mushaf Images. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)* 2023; 7(2); 236-245.
- [23] Wei, J., & Qu, Y. (2023). Lightweight improvement of YOLOv6 algorithm for small target detection. <https://www.researchsquare.com/article/rs-2687469/v1> (Erişim Tarihi: Mayıs 2023).
- [24] Dewi C. Chen A. P. S. Christanto H. J. Deep Learning for Highly Accurate Hand Recognition Based on Yolov7 Model. *Big Data and Cognitive Computing* 2023; 7(1): 53.
- [25] Tang F. Yang F. Tian X. Long-Distance Person Detection Based on YOLOv7. *Electronics* 2023; 12(6); 1502.
- [26] Chen J. Ma B. Ji C. Zhang J. Feng Q. Liu X. Li Y. Apple inflorescence recognition of phenology stage in complex background based on improved YOLOv7. *Computers and Electronics in Agriculture* 2023; 211: 108048.
- [27] Cao L. Zheng X. Fang, L. The Semantic Segmentation of Standing Tree Images Based on the YOLOv7 Deep Learning Algorithm. *Electronics* 2023; 12(4); 929.
- [28] Terven J. Cordova-Esparza D. A comprehensive review of YOLO: From YOLOv1 to YOLOv8 and beyond. *arXiv preprint arXiv 2023;2304.00501*.
- [29] Aboah A. Wang B. Bagci U. Adu-Gyamfi Y. Real-time multi-class helmet violation detection using few-shot data sampling technique and yolov8. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*; 17-24 June 2023; Vancouver, BC, Canada: IEEE pp. 5349-5357.
- [30] Zhao H. Jin J. Liu Y. Guo Y. Shen Y. FSDF: A high-performance fire detection framework. *Expert Systems with Applications* 2024; 238: 121665.



## Bal Arı Hastalıklarının Sınıflandırılması için ConvMixer, VGG16 ve ResNet101 Tabanlı Topluluk Öğrenme Yaklaşımı

Mustafa ALTIN<sup>1\*</sup>, Hüseyin ÜZEN<sup>2</sup>, İpek BALIKÇI ÇİÇEK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Matematik, Fen Edebiyat Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

<sup>3</sup> Biyoistatistik ve Tıp Bilişimi Anabilim Dalı, Tıp Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

\*<sup>1</sup> maltin@bingol.edu.tr, <sup>2</sup> huzen@bingol.edu.tr, <sup>3</sup> ipek.balikci@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 12/07/2023;

Kabul/Accepted: 10/11/2023)

**Öz:** Bal arıları birçok etkenden dolayı ekosistemin en önemli bileşenlerinden biridir. Fakat son zamanlarda artan varroa paraziti, iklim değişiklikleri ve böcek istilası gibi etkenlerden dolayı bal arıları tehdit altındadır. Bundan dolayı son zamanlarda gelişmiş yapay zekâ teknikleri ile arıların analiz edilmesi oldukça önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bu çalışmada arı hastalıklarının sınıflandırılması için Evrimsel sinir ağ mimarileri tabanlı bir topluluk öğrenme yaklaşımı sunulmuştur. ConvMixer, VGG16 ve ResNet101 tabanlı topluluk öğrenme yaklaşımı (CVR-TÖY) olarak adlandırılan bu model temel olarak VGG16, ResNet101 ve ConvMixer sınıflandırıcılarının tahmin skorlarının birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu sayede farklı yaklaşım teknikleri ile geliştirilen VGG16, ResNet101 ve ConvMixer yapılarının tahmin çıktıları etkili bir şekilde birleştirilerek bal arı hastalık sınıflandırma performansı artırılmıştır. Tahmin skorları birleştirilirken iki yaklaşım denenmiştir. Birinci yaklaşımda modellerin tahmin çıktılarının en yüksek değeri alınarak sınıflandırma tahmini yapılmıştır. İkinci model ise ortalama değer alma yaklaşımıdır. Ortalama değer alma yaklaşımının ortak akıl modeli ile en iyi sonucu ürettiği görülmüştür. Deneysel çalışmalarda 6 farklı kovan probleminden etkilenen arı görüntülerini içeren BeelImage Dataset (BI) veri kümesi kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada önerilen modelden %98.87 F1-skoru elde edilmiştir. Ayrıca yapılan deneysel çalışmada önerilen model son teknolojik modeller ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda önerilen modelin F1-skoru %2.31 daha yüksek performans göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Bal Arısı, ConvMixer, VGG16, ResNet101, Topluluk Öğrenme Yaklaşımı

### ConvMixer, VGG16 and ResNet101 Based Ensemble Learning Approach for Classification of Honey Bee Diseases

**Abstract:** Honey bees are one of the most important components of the ecosystem due to many factors. However, honey bees are under threat due to factors such as varroa parasite, climate change and insect infestation, which have increased recently. Therefore, the analysis of honey bees with advanced artificial intelligence techniques has been a very important research topic recently. In this study, an ensemble learning approach based on convolutional neural network architectures is presented for the classification of bee diseases. This model, called ConvMixer, VGG16 and ResNet101-based ensemble learning approach (CVR-TOY), is basically based on the combination of predictive scores of VGG16, ResNet101 and ConvMixer classifiers. In this way, the prediction outputs of VGG16, ResNet101 and ConvMixer structures developed with different approach techniques were effectively combined to increase honey bee disease classification performance. Two approaches were tried when combining the prediction scores. In the first approach, classification prediction is made by taking the highest value of the prediction outputs of the models. The second model is the averaging approach. It has been seen that the averaging approach produces the best results with the common sense model. In experimental studies, BI dataset, which contains images of bees affected by 6 different hive problems, was used. In this experimental study, an F1-score of 98.87% was obtained from the proposed model. In addition, the proposed model in the experimental study was compared with the latest technological models. As a result of the comparison, the F1-score of the proposed model showed 2.31% higher performance.

**Key words:** Honey Bee, ConvMixer, VGG16, ResNet101, Ensemble Learning Approach

#### 1. Giriş

Yaklaşık olarak 20.000 çeşit arı türü içerisinde yer alan bal arıları koloniler halinde bulunurlar ve dünyada ekolojik dengenin sağlanmasında görev yapan canlı türleri arasında yer almaktadır [1]. Arılar Dünya’da bulunan canlı türleri arasında en eskilerden birisi olduğu için, canlı türlerinin gelişiminde dolaylı yoldan da olsa çok büyük

\* Sorumlu yazar: [maltin@bingol.edu.tr](mailto:maltin@bingol.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5544-5910, <sup>2</sup> 0000-0002-0998-2130, <sup>3</sup> 0000-0002-3805-9214

bir etkisi vardır. Örneğin besin zincirinde en altta yer alan bitkilerin devamlılığı arıların tozlaşma yapmasıyla sağlanabilmektedir [2]. Arılar, besin zincirindeki yerinden çıktığı anda, bitki çeşitliliğinin her yıl %50 oranında azalabileceği düşünülmektedir. Bu azalma göz önüne alındığında yaklaşık dört yıl içerisinde yeryüzündeki bitkisel kaynaklardan %93.75'inin tükenebileceği ön görülmüştür [3]. Bitkilerdeki azalma ile bağlantılı olarak yağış sistemlerinde değişim ve bu durumun sonucu olarak da iklimlerde değişimler ve dolayısıyla su sorunları meydana gelecektir. Bu olumsuzluklar sonucunda çok kısa sürede yaşam döngüsü değişecek ve insanoğlunun yaşantısı sosyo-ekonomik ve kültürel yönden doğrudan etkilenecektir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda bal arılarının doğal ortamın yanı sıra toplumların üzerinde küresel bir etkisi olduğu görülmektedir. Hem doğa için hem de insanoğlu için son derece önemli bir yere sahip olan bal arılarının geleceği; çeşitli hastalıklar, iklim koşulları ve parazitlerden dolayı tehdit altındadır [4, 5].

Bal arılarının popülasyonunun azalmasına neden olan en önemli hastalıklardan biri varroa parazitidir. Varroa paraziti, bal arılarına yapışarak arının günlük yaşamını doğrudan etkiler. Özellikle arının yağ dokusu ile beslendiği için arının zayıflamasına ve arıda uzuv eksikliği gibi deformasyonlara sebep olmaktadır. Ayrıca varroa paraziti akut arı felcine sebep olan virüslerin kovana yayılmasına sebep olmaktadır. Varroa paraziti kovan içinde kolaylıkla çoğalabilmektedir. Bundan dolayı kovan varroa parazite maruz kaldığı takdirde tedavi edilmez ise öncelikle ciddi verim kaybına ve ileriki safhalarda arı kovanlarının yok olmasına sebep olmaktadır. Diğer yandan kovan böcekleri, soyulan kovan, karınca istilası ve kayıp kraliçe gibi bazı problemler de kovan sağlığını olumsuz etkilemektedir [4, 6, 7]. Bal ve polen ile beslenen küçük kovan böcekleri, peteklere fazla zarar verebilirler [8, 9]. Soyulan kovan problemi yabancı bir arının kovan içindeki balı çalmasıdır. Bunun sonucunda bal arılarının bağışıklık sistemleri zayıflar ve kovan sağlığı olumsuz etkilenir [10, 11]. Benzer şekilde bu probleme karınca istilaları da sebep olabilmektedir. Bu karınca istilası sonucunda bal arıları, kovanlarını terk edebilmektedirler [12]. Kraliçe arının kaybolması durumunda ise işçi arıları veya arıcılar yeni bir kraliçe arı bulamayabilir bunun sonucunda da koloni çoğalamaz ve bal arıları hayatta kalamaz [13].

Yukardaki problemler karşısında arıcıların devamlı olarak kovanları takip etmesi gerekmektedir. Arıcıların varroa parazitinin tespiti için pudra şekeri veya un ile rulo testi gibi yöntemleri vardır. Bunlara ek olarak hırsız arılar veya böcek istilası gibi problemler için de kovanlar belli aralıklar ile gözlemlenmektedir. Bu yöntemler zaman alıcı olmasının yanında yöntemin başarısı ve zararsız olması arıcının deneyimine bağlıdır [4, 7]. Yapılan çalışmalarda bu yöntemlerin veriminin düşük olduğu görülmüştür. Bundan dolayı, bu yöntemler yerine günümüzde gelişen kameralar ve yapay zekâ teknikleri arıların gözetlenmesi ve böylece bal arılarının hastalıklarının erken tespit edilmesinde çok daha etkili yöntemler olabilmektedirler [4-6].

Bu çalışmada bal arılarının hastalık tespiti için VGG16 [14], ResNet101 [15] ve ConvMixer [16] sınıflandırıcılarının tahmin skorlarının birleştirilmesine dayanan yeni bir topluluk öğrenme yöntemi sunulmuştur [17, 18]. Bu yöntemin geliştirilmesindeki temel amaç, günümüzde farklı yapılar ile geliştirilmiş güçlü yöntemleri bir araya getirmektir. Özellikle sınıflandırma başarısının ana kaynağı olan güçlü öznitelikler için farklı temel yapı taşları ile oluşturulmuş yapıları bir araya getirilmiştir. Bu doğrultuda, topluluk öğrenme için öznitelik çeşitliği göz önünde bulundurularak; VGG16, ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarileri temel alınmıştır. Kullanılan VGG16 ağ mimarisi 16 katmana sahip kısmen sığ bir ağ mimarisidir. Diğer yandan ResNet101 ağ mimarisi atlama bağlantıları ile geliştirilen ve 101 katmana sahip oldukça derin bir ağ mimarisidir. Son olarak son zamanlarda oldukça popüler olan ConvMixer ağ mimarisi görüntü parçalama tekniğini temel alan ve global öznitelik elde edebilen bir ağ mimarisidir. Bu ağ mimarilerinin çıktılarını birleştirmek için sınıflandırıcı çıktı tahminleri ortalama ve en yüksek değer alma şeklinde iki farklı yaklaşım kullanılmış ve bunlar karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda ortalama değer alma etkili bir model olmuştur.

Bu çalışmanın devamı şu şekilde organize edilmiştir: Bal arıları ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar bölüm 2'de sunulmuştur. Bölüm 3'te önerilen modelde kullanılan metotlara yer verilmiştir. Bölüm 4'te önerilen yaklaşım verilmiştir. Son olarak bölüm 5 ve 6'da deneysel çalışmalar ve sonuçlar verilmiştir.

## 2. İlgili Çalışmalar

Dünyada doğal yaşam ve ekonomi için oldukça önemli bir konuma sahip olan arıcılık sektörü, son yıllarda yaşanan koloni kayıplarından dolayı bilgisayar bilimcilerinin dikkatini çekmiştir [19, 20]. Son 10 yılda arılara müdahale etmeden görüntüleme teknolojileri kullanarak arıların analiz edilmesi ve bazı arı hastalığının teşhisi için birtakım çalışmalar yapılmıştır. Bal arıların görüntüleme tabanlı analiz yöntemlerinin temel amacı kovanın iç veya dış ortamından alınan görüntülerin makine öğrenmesi veya görüntü işleme algoritmalarının yardımı ile arılar hakkında bazı çıkarımların yapılmasıdır. Bu alanda yapılan bazı bilimsel çalışmalar aşağıda özetlenmiştir;

Kimura ve ark. (2011) tarafından, bal petekleri üzerinden alınmış görüntülerden vektör niceleme metodu ile arıların bireysel tespiti ve takibi yapılmıştır. Yapılan çalışmada arıların sallanma dansını analiz ederek bal arılarının davranışları hakkında çıkarımlar yapılmıştır [6]. Ayrıca, Chen ve ark (2012), bal arılarının kovan giriş ve çıkış aktivitelerini analiz etmek için bir görüntüleme sistemi geliştirmiştir. Geliştirilen sistem kızıl ötesi kamera, kızıl ötesi aydınlatma ve geçiş yolundan oluşmaktadır. Kovan girişine konumlandırılan sistem sayesinde arıların giriş ve çıkış hareketleri kaydedilmektedir. Analizler için kovan içerisinde rastgele seçilen 100 adet arının sırt bölgesine iki karakterden oluşan bireysel bir kod ile etiketlenmiştir. Etiketlemenin temel amacı seçilen 100 adet arının günlük olarak kaç defa ve günün hangi saatlerinde kovan içerisine veya dışarıya çıktıklarını tespit etmektir. Arıların giriş veya çıkış hareketleri sırasında kameradan alınan arı görüntüleri destek vektör makinesi (SVM) sınıflandırıcı kullanılarak yapılandırılan karakterlerin tanımlaması yapılmıştır. Bu şekilde arılar birbirlerinden ayırt edilmiştir. Yapılan çalışmada karakter tanıma için SVM sınıflandırıcısı %86 - %98 oranında başarılar elde etmiştir [21]. Bu alanda yapılan başka bir çalışma ise Chiron ve ark. (2013) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, farklı seviyelerde uçan bal arıların takibi için hem yoğunluk hem de derinlik görüntülerini alabilen 3 boyutlu bir kamera kullanmıştır. Arı takibi için Kalman Filtre ve Küresel En Yakın Komşu yöntemleri kullanmıştır [22]. Yapılan çalışma olumlu sonuçlar vermesine karşın yöntemin uygulanması için yüksek maliyet gerektirmektedir. Tashakkori ve ark. (2015), Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio-SNR) yöntemi kullanmıştır. Fakat bu yöntemlerde görüntülerde bal arısının kameraya yakın veya uzakta uçmasından dolayı oluşacak boyut değişikliği yöntemlerin başarısını direkt etkileyecektir [23]. Bozek ve ark. (2017) bal arılarının segmentasyonu için Evrişimsel Sinir Ağları (ESA) tabanlı U-net mimarisi önermiştir. Yapılan çalışmada veri kümesi için yüksek çözünürlüklü bir kamera yardımı ile petek üzerinde bulunan toplu bal arısı görüntüleri elde edilmiştir. Daha sonra önerilen U-net mimarisi ile arı segmentasyonu yapılmıştır. Segmentasyon sonucu elde edilen arı görüntülerinden temel bileşen yöntemi ile her bir arının rotasyonu belirlenmiştir. Yapılan çalışma yaklaşık olarak %96 oranında başarılar göstermiştir [7].

Tashakkori ve ark. (2017), kovan girişine monte edilmiş bir kamera yardımı ile bal arılarının giriş ve çıkış aktivitelerini analiz etmiştir. Yapılan çalışmada mini bilgisayar sistemleri (Raspberry Pi) kullanarak kovanların uzun süre boyunca izlenmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Geliştirilen sistem 9 saate kadar görüntü alabilmektedir. Alınan görüntüler toplanıp çevrimdışı olarak işlenmiştir. Yapılan çalışmada sadece görüntü alınması hakkında değerlendirmeler yapılmıştır [20]. Boenisch ve ark. (2018), 10 hafta boyunca yaklaşık 2000 arıyı etiketleyerek izlemiştir. Çalışmada kullanılan görüntüleme sistemi iki tarafı kamera ile gözetlenen bir petekten oluşmaktadır. Alınan görüntüler görüntü tanıma ve makine öğrenme yöntemleri ile tüm arıların sırt bölgesinde bulunan bireysel kodlar çözülerek arılar birbirinden ayrılmıştır. Çalışmada 10 hafta boyunca bal arılarının bireysel faaliyetleri kapsamlı bir şekilde toplanmış ve değerlendirilmiştir [24]. Magnier ve ark. (2018), kovan giriş ve çıkış aktiviteleri saymak için arka plan çıkartma, kenar bulma, eşikleme, elips uydurma gibi temel görüntü işleme algoritmaları kullanılmıştır. Test sonuçlarında ortalama olarak %75 oranında doğruluk sonucu elde edilmiştir [25]. Rodriguez ve ark. (2018), görüntüleme sistemi yardımı ile arıların yiyecek arama davranışlarını analiz etmişlerdir. Bu çalışmada kovan girişine konulmuş bir görüntüleme sistemi ile arılar düzenli olarak videolara alınmıştır. Alınan video çerçevelerindeki arılar kırpılmış daha sonra bu kırpılmış arı görüntüleri geliştirilen bir ESA mimarisi yardımı ile polen taşıma ve taşımama durumlarına göre sınıflandırılmıştır. Farklı ESA ağ mimarileri kullanılarak yapılan testlerde %92.14-%94.36 oranlarında sonuçlar bulunmuştur [26]. Kim ve ark. (2019), geliştirilen görüntüleme sistemi yardımı ile bal arılarının varroa paraziti taşıyıp taşımama durumları incelenmiştir. Kovan girişine yerleştirilen görüntüleme sistemi kovan içerisine giren her bir arının görüntüsünü almaktadır. Daha sonra alınan bu görüntülerden görüntü işleme algoritması ve derin öğrenme yöntemi ile kovandaki varroa paraziti seviyesi tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda varroa paraziti tespiti için geleneksel yöntemlere karşı görüntüleme sisteminin kullanılabilirliği ispatlanmıştır. Çalışmada 19 farklı nanometre(nm) alanında görüntü alabilen multispektral kamera kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda varroa paraziti tespiti için en uygun 3470 (mavi), 630 (kırmızı) ve 780 (kızılötesi) nm bulunmuştur [5]. Yapılan çalışmada sınıflandırıcı için lineer diskriminant analiz yöntemi kullanılmıştır. Yang ve ark. (2021), arı hastalık tespiti için BI veri kümesini 5 farklı ESA mimarisi ile sınıflandırmış ve sınıflandırma sonuçları analiz edilmiştir [4]. Kullanılan veri kümesi 5172 tane arı görüntüsü içermektedir. Jenny tarafından yayınlanan bu veri kümesi arıların doğal ortamında çekilmiş videoların işlenerek arı görüntüleri çıkartılması ve sonrasında her bir arı görüntüsünün sağlık durumlarının uzmanlar tarafından etiketlenmesi ile oluşturulmuştur [27]. Yoo ve ark. (2023), arıların sağlık durumlarını sınıflandırmak için transformer tabanlı BeeNet ağ mimarisini önermişlerdir. Önerilen ağ mimarisi iki bölüme oluşmaktadır. Birinci bölümde ResNet50 ağ mimarisi ile derin öznitelikler elde edilmiştir. İkinci bölümde ise elde edilen derin öznitelikler Transformer modeli ile sınıflandırılmıştır. Önerilen yaklaşım hem arıları sınıflandırmada hem de arıların sağlık durumlarının sınıflandırılmasında kullanılmıştır. Bu model ile arıların sınıflandırılmasında %92.45 doğruluk ve arıların sağlık durumlarının sınıflandırılmasında

%94.50 doğruluk skoruna ulaşmıştır [28]. Vouidiotis ve ark. (2022), arılar üzerindeki varroaları tespit etmek için MobileNet V2-Faster R-CNN modelini önermişlerdir. Önerilen modelde öncelikle görüntü işleme tabanlı bir ön işleme ile arı tespiti yapılmıştır. Daha sonra MobileNet V2-Faster R-CNN modeli ile arı üzerindeki varroalar tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada MobileNet V3 ve ResNet50 omurga ağ yapıları denenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda performans (%77 doğruluk ve %86 kesinlik) açısından MobileNet V2 omurga ağı daha etkili sonuçlar üretmiştir. Ayrıca bu çalışmada gerçek zamanlı uygulamalar için MobileNet V2 modelinin etkili olduğu belirtilmiştir [29].

### 3. Materyal ve Yöntem

#### 3.1. VGG16, ResNet 101 ve ConvMixer ağ mimarileri

Bu çalışmada arı hastalıklarını sınıflandırmak için topluluk öğrenme modeli kullanılmıştır. Topluluk modelleri için farklı karakteristik yapıya sahip olan önceden eğitilmiş VGG16 ve ResNet101 ağ mimarileri kullanılmıştır. Bu modellere ek olarak son zamanlarda oldukça popüler olan ConvMixer modeli kullanılmıştır. Bu bölümde öncelikle, daha önceden eğitilmiş modeller genel olarak ele alınmıştır. Daha sonra, son zamanlarda oldukça popüler olan ConvMixer ağ mimarisi detaylandırılmıştır.

##### 3.1.1. Önceden eğitilmiş VGG16 ve ResNet 101 ağ mimarileri

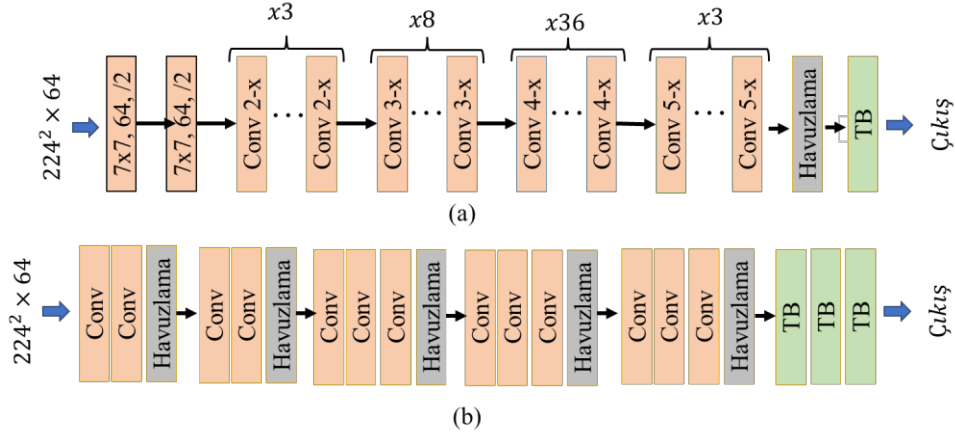
Gelişmiş GPU sistemlerinin yaygınlaşması ile birçok farklı ESA mimarisi önerilmiştir. VGG16 mimarisi bu mimarilerinin öncüsüdür. Birçok çalışmada uygulanan VGG16 mimarisi etkileyici performanslar göstermiştir. Arka arkaya gelen 16 evrişim katmanından oluşan VGG16 mimarisinden daha derin öznetelikler elde etmek için 19 katmandan oluşan VGG19 ağı geliştirilmiştir. Bu sayede daha derin anlamsal öznetelikler elde edilmesiyle başarı artırılmaya çalışılmıştır. Fakat derin öğrenmede katman sayısı arttıkça kaybolan gradyan problemi oluşmaya başlamaktadır [15, 30].

ESA mimarileri eğitiminde geri yayılım modelini kullanmaktadır. Geriye yayılım fonksiyonu Denklem 1'de verilmiştir.

$$w_1 = w_1 - \alpha \frac{\partial J(W)}{\partial w_1} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial J}{\partial w_1} = \frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial w_{n-1}} \dots \frac{\partial w_2}{\partial w_1} \quad (\text{Zincir Kuralı})$$

Burada J amaç fonksiyonu ve e hatayı göstermektedir.  $w_1$  parametresinin güncellenmesi için  $\frac{\partial J}{\partial w_1}$  türevinin hesaplanması gerekmektedir.  $\frac{\partial J}{\partial w_1}$  hesaplamak için zincir kuralı uygulanmıştır.  $\frac{\partial e}{\partial w_{n-1}} \dots$  zincir kuralında geçerli olan ara katmanlarının türevini temsil etmiştir.  $\alpha$  değeri adım genişliğini göstermektedir ve genellikle küçük bir değer seçilmektedir. Bu sayede ağı parametreleri küçük bir miktar değiştirilerek güncellenmektedir [31]. Burada temel olarak beklenen çıktı ile tahmin çıktısı arasındaki hata değeri elde edilir. Daha sonra bu hatanın gradyanı kullanılarak optimum ağırlıklara gidecek yön bulunmaya çalışılır. Son olarak evrişim katmanlarına geri yayılarak yön bilgisi ile evrişim katmanları güncellenir. Fakat ardışık katmanlarda ve kısmi türevden dolayı arka arkaya gelen çarpma işlemi ileriki katmanlarda gradyan bilgisi sıfıra çok yaklaştıır. Bu durum kaybolan gradyan olarak tanımlanmıştır. Bu problem ile başa çıkmak için bazı araştırmacılar atlama bağlantılarını önermiştir [14, 15, 32]. Atlama bağlantıları geri yayılımda ara bağlantılar sağlayarak önceki katmanlarının eğitilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca atlama bağlantıları ile ilk katmandaki öznetelikler sonraki katmanlara taşınarak etkili bir yapı sunmaktadır. Bu model ile geliştirilen ResNet50 ve ResNet101 mimarilerinin birçok çalışmada üstünlüğü kanıtlanmıştır. Şekil 1'de VGG16 ve ResNet 101 ağ mimarisinin katman detayları verilmiştir.



Şekil 1. ResNet101 (a) ve VGG16 (b) ağ mimarilerinin genel gösterimi

### 3.1.2. ConvMixer ağ mimarisi

Vision Transformer (ViT) modeli derin öğrenmede yeni bir dönem açmıştır [33, 34]. Fakat ViT modelinin öz dikkat mekanizması ikinci dereceden karmaşıklığa sahiptir. Bundan dolayı ViT modeli yüksek seviyede veri ve donanım gereksinimine ihtiyaç duymaktadır [34, 35]. Bu problemlerden yola çıkan Trockman vd. ViT modelinin performans kaynağının araştırması ile ConvMixer modelini geliştirmiştir [16].

ConvMixer modelinde MLP mixer ve ViT modelinde olduğu gibi giriş görüntüsü yamalara bölünmektedir. Daha sonra yamaları temsil eden çıktıya bir dizi evrişim işlemleri uygulanmaktadır. Bununla birlikte ConvMixer modelini parçalama işlemi için geleneksel bir evrişim katmanı kullanılmaktadır. Fakat burada çekirdek ve atlama değeri parça boyutu (patch size (p)) olarak ayarlanmıştır. Bu işlemler Denklem 2’de gösterilmiştir.

$$z_0 = \text{BN} \left( \sigma \left( \text{Conv}_{\text{kernal:p}}^{\text{stride:p}} (\text{image}) \right) \right) \quad (2)$$

Burada verilen  $z_0$  ve  $p$  sırası ile görüntü yamalara bölme çıktısı ve yama boyutunu temsil eder. Denklem 2’de gösterildiği gibi parçalama işleminde evrişim işleminden sonra sırası ile GELU ( $\sigma$ ) ve Batch normalizasyon (BN) katmanı uygulanmıştır. Ayrıca Evrişim işleminde filtre sayısı  $h$  olarak alınmıştır. Denklem 2 işleminin sonucunda  $W \times H$  boyutundaki giriş görüntüsü  $\frac{W}{p} \times \frac{H}{p} \times h$  boyutunda bir çıktı elde edilmektedir. Bu çıktıdaki her bir vektör dizisi ( $1 \times 1 \times h$ ), bir yamayı temsil etmektedir. ConvMixer modelinin ikinci aşamasında  $z_0$  çıktısı bir derinlemesine ayarlanabilir evrişim bloğuna aktarılmıştır. Bu evrişim bloğu Denklem 3’de gösterilmiştir.

$$z'_1 = \text{BN} \left( \sigma \left( \text{DepthWiseConv}(z_{1-1}) \right) \right) + z_{1-1} \quad (3)$$

$$z_1 = \text{BN} \left( \sigma \left( \text{PointWiseConv}(z'_1) \right) \right)$$

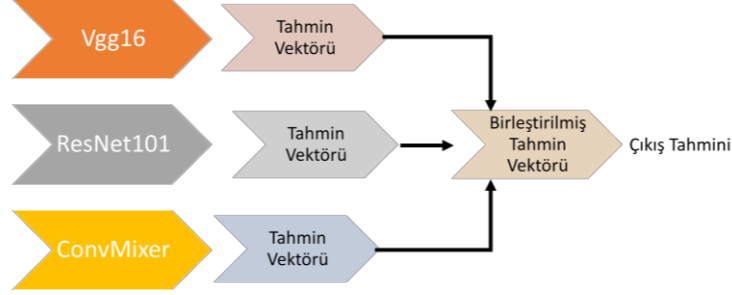
Denklem 3’de gösterildiği gibi derinlemesine ayarlanabilir evrişim bloğu iki aşamada gerçekleşir. Bunlar sırası ile derinlemesine evrişim ve noktasal evrişimdir. Her evrişim işleminden sonra sırası ile GELU ( $\sigma$ ) ve Batch normalizasyon (BN) işlemi uygulanmıştır. Ayrıca Denklem 3’de görüldüğü gibi ConvMixer modelinde Residual atlama bağlantıları mevcuttur. Bu sayede öznelik haritaları arasında bilgi aktarımları sağlanmaktadır.

### 3.2. Önerilen topluluk öğrenme yaklaşımı

Bu çalışmada arıların hastalık durumlarının sınıflandırılması için ConvMixer, VGG16 ve ResNet101 tabanlı Topluluk Öğrenme Yaklaşımı (CVR-TÖY) önerilmiştir. Önerilen modelde Bölüm 3.1’de verilen VGG16 ve ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarileri kullanılmıştır. VGG16 modeli 16 katmana sahip sığ bir ağ mimarisidir. Bundan dolayı sınıflandırıcı skoru elde etmede mekânsal ayrıntılar ön plana çıkmaktadır. ResNet101 modeli ise 101 katmana sahip derin bir ağ mimarisidir. Bu ağ mimarisi atlama bağlantıları sayesinde oldukça etkili bir yapı sergilemektedir. Ayrıca derin katmanları sayesinde güçlü anlamsal öznelikler elde etmektedir. Son olarak

ConvMixer modeli geleneksel evrişim ağlarının aksine görüntü parçalama modeli kullanır. Bu sayede görüntüdeki farklı noktalar arasındaki ilişkiyi elde eden güçlü öznitelikler elde etmektedir. VGG16 ve ResNet101 ve ConvMixer ağ modelinin farklı yaklaşımlarından dolayı önerilen modelde bu modeller kullanılmıştır.

Önerilen topluluk öğrenme yaklaşımında VGG16 ve ResNet101 ve ConvMixer ağ modelleri bağımsız olarak eğitilmektedir. Daha sonra eğitilmiş bu modeller topluluk öğrenme yaklaşımı modeli kullanılarak ortak bir sınıflandırma skoru elde etmek için sonuçlar birleştirilir. Bu yaklaşım Şekil 2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Önerilen ConvMixer, VGG16 ve ResNet101 tabanlı Topluluk Öğrenme Yaklaşımı

Birleştirme işlemi için iki yaklaşım kullanılmıştır. Birinci yaklaşımda modellerin tahmin çıktıları arasında en yüksek puana sahip çıktı temel alınarak tahmin çıktısı olarak ele alınır. Bu modelin formalizasyonu Denklem 4’de verilmiştir.

$$P_{\max\_çıkış} = \operatorname{argmax}(\operatorname{concat} \left( \begin{pmatrix} P1 \\ P2 \\ P3 \end{pmatrix} \right)) \quad (4)$$

Denklem 4’de verilen P1, P2 ve P3 sırası ile ConvMixer, ResNet101 ve VGG16 ağ mimarilerinin tahmin çıktı vektörleridir. Bu vektörler 6 boyutludur. Vektördeki her değer sırası ile sağlıklı, varroa paraziti ve karınca istilası gibi sınıflarının tahmin çıktısıdır. Denklem 4’de öncelikle 3 vektör birleştirme katmanı (concat()) ile birleştirilir. Birleştirme işleminin sonucunda 3x6 boyutlu bir matris elde edilir. Daha sonra bu matristeki en yüksek oylamaya sahip değer (argmax()) temel alınarak sınıflandırma çıktısı ( $p_{\max\_çıkış}$ ) elde edilir.

En yüksek değeri alma metodunda sınıflandırıcılar rekabet halindedir. Diğer bir deyişle sınıflandırıcılar arasında ortak bir bağ aramaz ve en iyi tahmin skoruna erişen kazanır. Fakat bu en iyi tahminin doğru olup olmadığı belli değildir. Bundan dolayı sınıflandırıcılar arasında rekabet yerine ortak akıl yaklaşımı (Averaging) daha iyi performans sergileyebilir. Çünkü iki sınıflandırıcının kısmen düşük skorlar ile tahmin ettiği doğru sınıfı diğerinin yüksek skorla ile tahmin ettiği yanlış sınıfı oylama modeli ile engelleyebilir. Bu metotta öncelikle sınıflandırıcıların sonuçlarının ortalaması alınır. Daha sonra ortalama alınmış çıktılar temel alınarak sınıf çıktısı elde edilir. Ortalama temelli topluluk yaklaşımının formalizasyonu Denklem 5’de verilmiştir.

$$P_{\text{ortalama}}(i) = \frac{1}{N} \sum_j^N P_{i,j} \quad (5)$$

$$p_{\text{ort\_çıkış}} = \operatorname{argmax}(P_{\text{ortalama}})$$

Denklem 5’de gösterilen j sınıflandırıcılarının tahmin çıktısında elde edilen 6 boyutlu vektörlerin indeksidir. i değeri ise bu vektörlerde dolaşım sağlayan indekstir. Denklem 5’de verilen  $P_{\text{ortalama}}$  tahmin çıktılarının ortalama değerlerini temsil eden vektördür. Bu vektör 6 boyutludur. Denklem 4’ün ikinci kısmında ortalama değerleri temsil eden bu vektördeki en yüksek puana (argmax) göre sınıflandırma çıktısı ( $p_{\text{ort\_çıkış}}$ ) elde edilir.

Önerilen yaklaşımda kullanılan VGG16 ve ResNet101 mimarileri (tam bağlı katmanlar hariç) orijinal yapılarındaki gibi kullanılmıştır. Sadece arı hastalıklarının sınıflandırılması için katmanlarına ortalama havuzlama katmanı ve tam bağlı katman eklenmiştir. Bu tam bağlı katman 6 nöronludur. Diğer yandan kullanılan ConvMixer ağ mimarisinde parça boyutu 4, derinlik 8 olarak ayarlanmıştır. Ayrıca sınıflandırma çıktısı için ağ mimarisinin son katmanlarına ortalama havuzlama katmanı ve tam bağlı katman eklenmiştir.

Her bir sınıflandırıcı çıktısında, sınıfların olasılık dağılımını gösteren 3 boyutlu bir vektör elde edilmektedir. Bu nedenle, bu çıktı için Kategorik Çapraz Entropi kayıp fonksiyonu kullanılmıştır. Sınıflandırma ağı için kullanılan Kategorik Çapraz Entropi kayıp fonksiyonu Denklem 6'da gösterilmiştir.

$$L_{cls} = - \sum_k^M Y_k \log(P_k) \quad (6)$$

Denklem 6'da  $L_{cls}$  sınıflandırma ağının kayıp değerini,  $Y$  ve  $P$  sırasıyla 6-boyutlu beklenen ve tahmin vektörlerini ifade eder.  $M$  sınıf sayısını ve  $k$  sınıfların indeksini temsil eder.

#### 4. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde önerilen ConvMixer, VGG16 ve ResNet101 tabanlı CVR-TÖY detaylı deneysel çalışmalar ile analiz edilmiştir. Analizler i7 intel işlemci, 32 GB ram ve RTX3080 ti ekran kartı donanıma sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda tüm modeller için öğrenme oranı, adım sayısı ve batch boyutu sırası ile 0.0001, 50 ve 16'dır. Deneysel çalışmaların sonuçları; doğruluk, F1-skor, kesinlik ve duyarlılık metrikleri kullanılarak verilmiştir. Değerlendirme sonuçları F1-skor ve doğruluk sonuçları temel alınmıştır.

##### 4.1. Veri kümeleri

Bu çalışmada deneysel çalışmalar için BI veri seti kullanılmıştır [36]. Bu veri kümesi varroa paraziti, karınca istilası, kayıp kraliçe, soyulan kovan, böcek istilası gibi problemleri içeren arı görüntülerinden oluşmaktadır. BI veri kümesi toplamda 5172 görüntü ve 6 sınıftan oluşmaktadır. Bu sınıflar sırası ile varroa istilası, karınca istilası, kayıp kraliçe, soyulan kovan, böcek istilası ve sağlıklı arı şeklindedir. Veri setinden alınan örnek görüntüler, Şekil 3'te verilmiştir. Deneysel çalışmalarda eğitim için veri kümesinin %80'i rastgele olarak alınmış geri kalanı ise test için kullanılmıştır.



Şekil 3. BI veri kümesinden örnek görüntüler. (a) Sağlıklı, (b) Karınca istilası, (c) soyguncu arı, (d) Kayıp kraliçe, (e) böcek istilası, (f) Varroa paraziti.

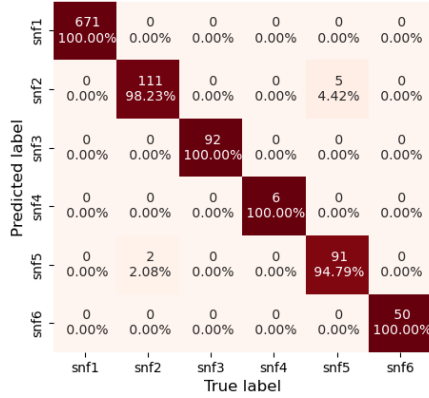
##### 4.2. Önerilen modelin diğer son teknolojik modeller ile karşılaştırılması

Bu deneysel çalışmada önerilen model son teknolojik modeller ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda VGG16, MobileNet, InceptionV3, ResNet101, ResNet50 ve EfficientNet, Swin Transformer, ConvMixer modelleri kullanılmıştır [37-39]. Bu karşılaştırma sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

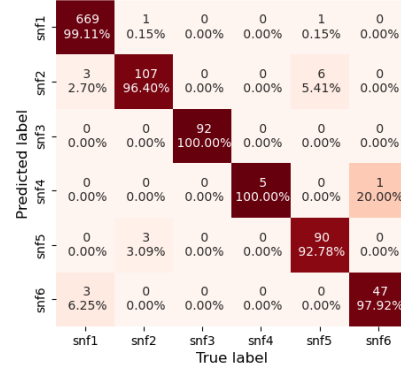
Tablo 1'de görüleceği üzere en yüksek doğruluk ve F1-skorları CVR-TÖY yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Buna ek olarak önerilen modelin yapısında kullanılan VGG16 ve ResNet101 modelleri ile ikinci en yüksek skorlar elde edilmiştir. Diğer yandan ConvMixer modeli ise %96.98 doğruluk skoruna ulaşmıştır. Her ne kadar ConvMixer modeli InceptionV3 ve MobileNet modelinden düşük sonuçlar üretmiş olsa da 3 modelin birlikte kullanılması etkili bir yapı oluşturmuştur. Tablo 1'de sonuçları VGG16, ResNet101, ConvMixer modellerin ve önerilen CVR-TÖY modelin karışıklık matrisi Şekil 4'de verilmiştir.

**Tablo 1.** CVR-TÖY modelinin son teknolojik modeller ile karşılaştırılması

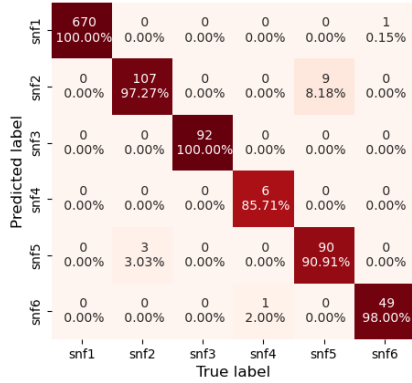
Model	Doğruluk	F1-skor	Kesinlik	Duyarlılık
VGG16	98.73	96.56	95.93	97.42
MobileNet	97.66	91.54	93.45	90.26
InceptionV3	97.37	92.62	95.46	90.93
ResNet101	98.63	96.44	95.31	97.81
ResNet50	98.63	94.95	94.92	94.98
EfficientNet	64.78	13.38	16.41	16.66
Swin Transformer	90.46	85.51	87.67	84.52
ConvMixer	96.98	94.97	94.87	95.12
<b>CVR-TÖY</b>	<b>99.31</b>	<b>98.87</b>	<b>98.83</b>	<b>98.92</b>



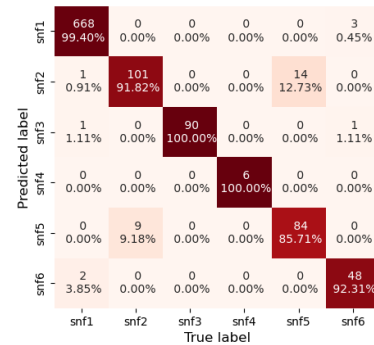
CVR-TÖY



ResNet 101



VGG16



ConvMixer

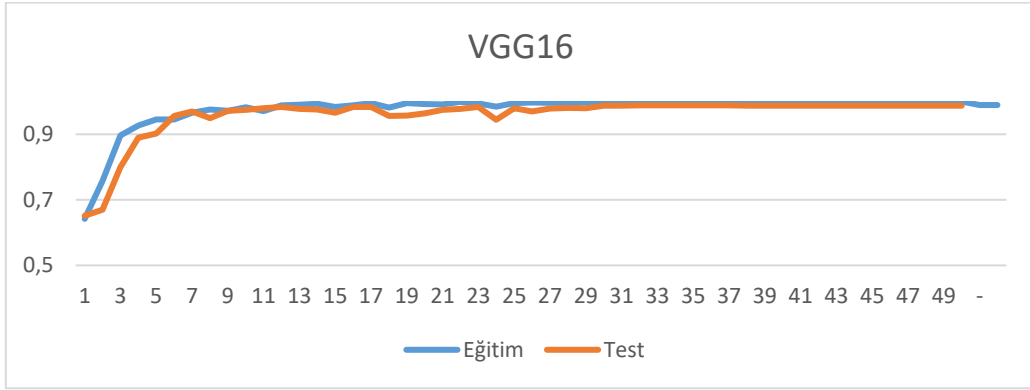
**Şekil 4.** CVR-TÖY, ResNet101, VGG16 ve ConvMixer modellerin Karışıklık Matrisleri

Şekil 4'de gösterildiği gibi CVR-TÖY modeli tüm sınıflarda, örneklerin %94'ünden fazlasını doğru tahmin etmiş bunun yanında sınıf 1, sınıf 3, sınıf 4 ve sınıf 6 sınıflardaki örneklerinin tamamını doğru sınıflandırmıştır. Diğer modeller arasında ConvMixer modeli ile sınıf 5'teki örneklerin %85.71'ini doğru sınıflandırılmışken VGG16 modeli ile sınıf 4'teki örneklerin %85.71'ini doğru sınıflandırılmıştır. Diğer yandan ResNet101 modeli ile VGG16 ve ConvMixer modellerine göre sınıf 1'de düşük skorlar elde edilmişken sınıf 4'de daha iyi skorlar elde edilmiştir. Modellerin farklı sınıflardaki farklı başarıları önerilen CVR-TÖY modelinde birleştirilerek daha yüksek skorlar sağlanmıştır.

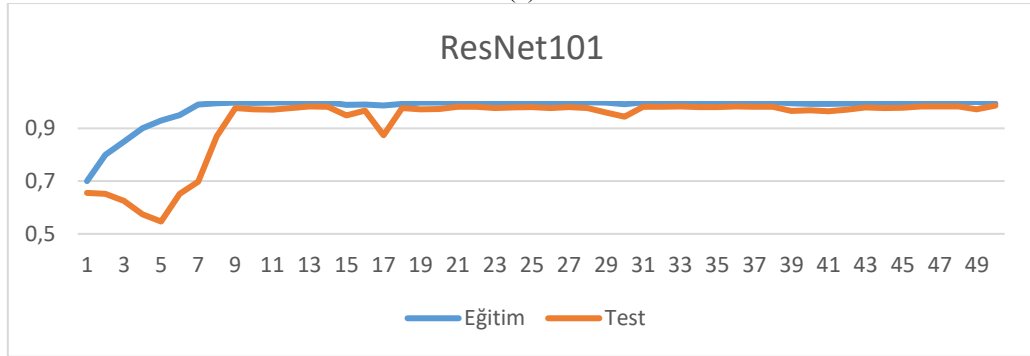


### 4.3. Ablasyon çalışmaları

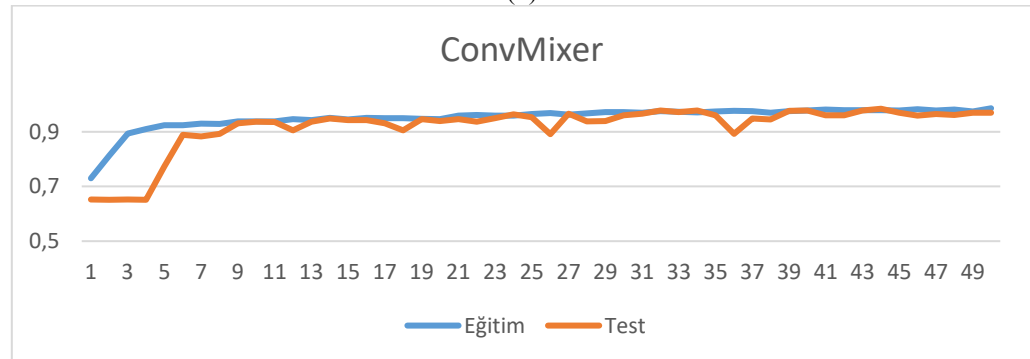
Önerilen CVR-TÖY modelinde topluluk öğrenme için VGG16, ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarileri kullanılmıştır. Topluluk öğrenme için ağ mimari seçiminde öznelik çeşitliliği temel alınmıştır. Bundan dolayı VGG16, ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarileri kullanılmıştır. Bu ağ mimarileri sırası ile sığ ağ mimarisi (VGG16), oldukça derin ağ mimarisi (ResNet101) ve global anlamsal öznelik elde edebilen ağ mimarisi (ConvMixer) olarak gruplandırılabilir. Çünkü en temel ağ yapılarından biri olan VGG16 ağ mimarisi 16 katmana sahip kısmen sığ bir ağ mimarisidir. Diğer yandan atlama bağlantıları ile geliştirilen ve 101 katmana sahip ResNet101 ağ mimarisi oldukça derin bir ağ mimarisidir. Son olarak ConvMixer ağ mimarisi görüntü parçalama tekniğini temel alan ve global öznelik elde edebilen son teknolojik bir ağ mimarisidir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5. Deneysel çalışmalarda en uygun adım sayısı belirlemek için 50 adım boyunca eğitim ve test veri kümesinden alınan doğruluk sonuçları

Önerilen VGG16, ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarileri kendi içinde sırası ile %98.73, %98.63 ve %96.98 doğruluk skoru elde etmiştir. Bu ağ mimarilerinin birleşimi ile önerilen topluluk öğrenme yaklaşımı %99.31 doğruluk skoru elde etmiştir. Ağ mimarilerinin eğitiminde aşırı öğrenme olup olmadığını analiz etmek ve en uygun adım sayısını belirlemek için 50 adım boyunca VGG16, ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarilerinin eğitim ve test sonuçları kaydedilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 5’te verilmiştir. Burada görüleceği üzere VGG16, ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarilerinde ortalama ilk 10 adımda ağ mimarilerinin eğitimi tamamlanmıştır. Bundan sonraki adımlarda ise elde edilen başarı genel olarak korunmuştur. Bu sonuçlar modellerde aşırı öğrenme olmadığını göstermektedir. Ayrıca Ağ mimarilerinin eğitimi için adım sayısının 50 seçilmesi yeterli olmuştur.

Önerilen CVR-TÖY modelinde VGG16, ResNet101 ve ConvMixer sınıflandırıcı modellerinin topluluk öğrenme yaklaşımı ile birleştirilmiştir. Buna ek birleştirme işlemi ortalama değer alma ve en büyük değeri seçme yaklaşımları denenmiştir. Bu yaklaşımların sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Burada verilen Model 1 sınıflandırma tahmin çıktısını sınıflandırıcının çıktılarındaki vektörlerin en yüksek tahmin puanına göre seçmektedir. Model 2 ise sınıflandırıcı çıktılarının ortalama değerleri alınarak sınıflandırma çıktısını tahmin etmektedir.

**Tablo 2.** Ortalama değer alma ve En yüksek değer alma modellerinin karşılaştırılması

Model	Topluluk öğrenme Stratejisi	Doğruluk	F1-skor	Kesinlik	Duyarlılık
Model 1	Ortalama değer alma	99.31	98.87	98.83	98.92
Model 2	En yüksek değer alma	98.73	97.89	97.71	98.17

Tablo 2’deki sonuçlar kıyaslandığında Model 1 ile %99.31 doğruluk ve %98.87 F1-skor elde edilmiştir. Buna kıyasla en yüksek değerini alarak çıktı tahmini elde eden model yaklaşık %0.45 doğruluk ve %1 F1-skor ile daha düşük performans üretmiştir. Bu sonuçlar gösteriyor ki sınıflandırma çıktılarının ortalama değerinin alınması daha yüksek performans sağlamaktadır.

Önerilen model 3 farklı ESA mimarisinin birleşiminden oluşmaktadır. Bu sınıflandırıcı sayısı 2 adet seçilme durumundaki skorları görmek için Tablo 3’teki deneysel çalışma yapılmıştır. Burada VGG16, ResNet101 ve ConvMixer mimarilerinin ikili kombinasyonu alınarak sonuçlar kaydedilmiştir.

**Tablo 3.** VGG16, ResNet101 ve ConvMixer modellerinin ikili kombinasyonları

Model	Doğruluk	F1-skor	Kesinlik	Duyarlılık
CVR-TÖY	99.31	98.87	98.83	98.92
ConvMixer-ResNet101	98.73	97.89	97.71	98.17
ConvMixer-VGG16	98.54	97.67	97.96	97.40
ResNet101-VGG16	99.02	97.07	96.27	98.07

Tablo 3’teki sonuçlarda görüldüğü üzere ikili kombinasyonlarda en yüksek F1-skor (%97.89) ConvMixer-ResNet101 modelleri ile elde edilmiştir. Buna kıyasla önerilen CVR-TÖY modelinden %0.98 daha yüksek F1-skoru elde edilmiştir.

Önerilen CVR-TÖY modeli Tablo 1 ve 3’teki sonuçlara bakıldığında VGG16, ResNet101 ve ConvMixer modelleri bir arada kullanarak çok etkileyici sonuçlar üretmiştir. Fakat bu modelde, farklı derin ağları bir arada kullanması zamansal açıdan zayıf kalmasına sebep olmaktadır. Çünkü önerilen model her ağ mimarisinden sonuç üretmesi beklendikten sonra bu sonuçları birleştirmektedir. Bu durumda önerilen model zaman açısından bireysel sonuçlara göre geride kalmaktadır. Bu durumu analiz etmek için önerilen modeller ayrı ayrı denenmiş ve zaman tüketimleri Tablo 4’te verilmiştir.

**Tablo 4.** CVR-TÖY, VGG16, ResNet101 ve ConvMixer modellerinin bir saniyedeki işleyebildiği görüntü sayısı (FPS, Frames Per Second)

Model	Doğruluk	FPS	Test için Harcanan Toplam Süre
CVR-TÖY	<b>99.31</b>	26.53	38.75
VGG16	98.73	<b>234.55</b>	<b>4.38</b>
ResNet101	98.63	39.48	26.04
ConvMixer	96.98	123.39	8.33

Tablo 4'te görüleceği üzere önerilen CVR-TÖY modeli her ne kadar %99.31 doğruluk skoruna ulaştığı görülse de zaman tüketimi açısından bir saniyede işleyebileceği görüntü sayısı 26.53'tür. Bu skor diğer modellerin en düşük FPS'sidir. Fakat arıların sağlık durumları bağımsız serverlarda işlenebildiğinden bu hız yeterli olarak görülebilir. Diğer yandan en yüksek FPS skoru VGG16 modeli ile elde edilmiştir. Gerçek zamanlı uygulamalar ve oldukça yüksek FPS'ye ihtiyaç duyulduğu durumlarda VGG16 ağ mimarisi kullanılabilir.

#### 4.4 Önerilen modelin literatürdeki yöntemler ile karşılaştırılması

Bu bölümde önerilen CVR-TÖY model literatürdeki modeller ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda ele alınan yöntemler ve yöntemlerin sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 5.** Önerilen CVR-TÖY modelin literatürdeki yöntemler ile karşılaştırılması

Metod	Yöntem	Veri Kümesi	Doğruluk	F1-skor
GoogLeNet-DVM [4]	ESA, Transfer Öğrenme, Derin Öznitelikler ve DVM Sınıflandırıcı	BI	98.20	97.28
KM [40]	ESA ve Derin Öznitelikler	BI	92.42	-
Deeplabv3-Resnet [40]	ESA, Transfer Öğrenme ve Görüntü Parçalama	Kişisel Varroa Veri Kümesi	-	95.0
BeeNet [28]	ESA, Derin Öznitelikler ve Transformer	Kişisel Varroa Veri Kümesi	94.50	-
US+CSC [41]	ESA ve Sınıftaki Örnek Sayısı Dengeleme	BI	93.46	90.00 (macro)
CVR-TÖY	ESA, Transfer Öğrenme ve Topluluk Öğrenme	BI	99.31	98.87

Tablo 5'te görüleceği üzere bal arılarının sağlık durumları sınıflandırmak için genellikle ESA mimarileri kullanılmıştır. Bunun yanı sıra GoogLeNet-DVM modeli GoogLeNet mimarisinden derin öznitelikler çıkartılmış ve DVM sınıflandırıcısı ile birleştirmiştir. Bu sayede %98.20 doğruluk skoruna ulaşılmıştır. GoogLeNet-DVM modelinin geliştirildiği çalışmada derin özniteliklerin önemi vurgulanmıştır [4]. Diğer yandan bu çalışmada önerilen CVR-TÖY modelinde ise daha güçlü ve çeşitli öznitelikler ile bal arılarının sağlık durumu sınıflandırmak için VGG16, ResNet101 ve ConvMixer ağ mimarileri birlikte kullanılmıştır. Bu sayede önerilen model ile 99.31 doğruluk skoru elde edilmiştir. Tablo 5'te verilen Deeplabv3-ResNet modeli arı görüntüsünde varroa olup olmadığını analiz etmek için görüntüleri parçalayarak varroa durumunu sınıflandırmıştır [28, 40]. Bu modelde ResNet101 ağ mimarisi kullanılmıştır. Bu model 95.0 F1-skora ulaşmıştır. BeeNet modeli iki aşamalı bir derin ağ mimarisidir. Önerilen modelde öncelikle ResNet50 ağ mimarisi ile derin öznitelikler elde edilmiştir. Daha sonra bu öznitelikler Trasformer modeli ile global öznitelikler çıkartılmıştır. Önerilen model %94.50 doğruluk skoruna ulaşmıştır. Her ne kadar elde edilen başarı oldukça etkili olsa da Transformer yaklaşımı oldukça maliyetlidir. Bunun yerine son zamanlarda gelişen ConvMixer çok daha ekonomik bir yaklaşımdır. Bu doğrultuda önerilen CVR-TÖY modeli global anlamsal öznitelikler çıkartmak için ConvMixer ağ mimarisi kullanmıştır. Sonuç olarak önerilen model Tablo 5'teki diğer modeller karşılaştırıldığında ConvMixer, ResNet101 ve VGG16 ağ mimarilerini bir arada kullanarak daha yüksek başarı sağlamıştır.

## 5. Sonuç

Bal arıları birçok etkenden dolayı ekosistemin en önemli bileşenlerinden biridir. Ekosistem için çok önemli bir konuma sahip olduğu için bal arılarının yaşam ortamlarının denetlenmesi ve bal arılarına ait hastalıkların tespit edilmesi önemli bir alan olmuştur. Varroa parazitleri, karıncalar, iklim değişiklikleri gibi bazı problemlerden dolayı arı kovanlarının verimsizleşmesi, arı kayıplarının artması ve bazı arı kolonilerinin yok olmasına sebep olmaktadır. Bu problemler karşısında geleneksel yöntemler zaman alıcı ve verimsiz olabilmektedir. Bundan dolayı son zamanlarda gelişmiş yapay zekâ teknikleri ile arıların analiz edilmesi oldukça önemli bir araştırma konusu olmuştur.

Bu çalışma ile arı hastalıklarının ESA mimarileri ile sınıflandırılması için topluluk öğrenme tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Bu model temel olarak VGG16, ResNet101 ve ConvMixer sınıflandırıcılarının tahmin skorlarının birleştirilmesine dayanmaktadır. Birleşim işlemi sınıflandırıcı çıktı tahminleri ortalama alınarak topluluk öğrenme modelinin çıktı tahmini elde edilmiştir. Bu sayede farklı yaklaşım teknikleri ile geliştirilen VGG16, ResNet101 ve ConvMixer yapılarının tahmin çıktıları etkili bir şekilde birleştirilerek bal arı hastalık tahmini performansı artırılmıştır. Ayrıca bu deneysel çalışmada BI veri kümesi kullanılmış olup önerilen CVR-TÖY modelinin bileşenleri ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Bu deneysel çalışmada önerilen model son teknolojik modeller ve literatürdeki yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda önerilen model %99.31 doğruluk ve %98.87 F1-skoru ile daha yüksek performans elde etmiştir.

Gelecekteki çalışmada bu çalışmada etkinliği kanıtlamış olan ConvMixer, VGG16 ve ResNet101 modellerini öznetelik katmanlarını birleştirmeye yönelik çalışmalar yapılacaktır.

## Kaynaklar

- [1] Muz MN, Özdemir N, Dilek M. Küresel arı sağlığı ve veteriner hekimlik. Veteriner Farmakoloji ve Toksikoloji Derneği Bülteni 2019; 10: 24-30.
- [2] Öztekin C, Çapa Aydın Y, Yılmaz Tüzün Ö. Biyoloji öğretmen adaylarının genel biyoloji konularındaki kavram yanlışları, Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi 2000; 140-147.
- [3] Huckle J, "British Bee Journal," ed: British Bee Publications, London, England, 1882.
- [4] Berkaya SK, Gunal ES, Gunal S. Deep learning-based classification models for beehive monitoring. Ecol Inf 2021; 64: 101353.
- [5] Bjerger K, Frigaard CE, Mikkelsen PH, Nielsen TH, Misbik M, Kryger P. A computer vision system to monitor the infestation level of Varroa destructor in a honeybee colony. Comput Electron Agric 2019; 164: 104898.
- [6] Kimura T, Ohashi M, Okada R, Ikeno H. A new approach for the simultaneous tracking of multiple honeybees for analysis of hive behavior Apidologie 2011; 42: 607-617.
- [7] Bozek K, Hebert L, Mikheyev AS, and Stephens GJ. Towards dense object tracking in a 2D honeybee hive. in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2018; 4185-4193.
- [8] Ellis JD. "Small hive beetle (Aethina tumida) contributions to colony losses," in Honey Bee Colony Health, ed: CRC Press, 2011; pp. 135-144.
- [9] Ellis J, Hepburn H. An ecological digest of the small hive beetle (Aethina tumida), a symbiont in honey bee colonies (Apis mellifera). Insectes sociaux 2006; 53: 8-19.
- [10] Metlek S, Kayaalp K. Detection of bee diseases with a hybrid deep learning method. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 2021; 36: 1715-1731.
- [11] Calvo J. "Causes and Effects of Losing a Queen Bee," ed, 2020.
- [12] Payne AN, Shepherd TF, Rangel J. The detection of honey bee (Apis mellifera)-associated viruses in ants. Sci Rep 2020; 10: 2923.
- [13] Yılmaz O, Ertürk YE. "Honey bee biology in Turkey," in VII International Scientific Agriculture Symposium, "Agrosym 2016", 6-9 October 2016, Jahorina, Bosnia and Herzegovina. Proceedings 2016; 2413-2418.
- [14] Simonyan K, Zisserman A. "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition," arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014.
- [15] Franceschini S, Ambrosiano M, Vitale S, Basile F, Gifuni A, Grassini G, et al., "Hand gesture recognition via radar sensors and convolutional neural networks," in 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20) 2020; 1-5.
- [16] Trockman A, Kolter JZ. "Patches are all you need?," arXiv preprint arXiv:2201.09792, 2022.
- [17] Mohammed A, Kora R. "A comprehensive review on ensemble deep learning: Opportunities and challenges," Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences 2023.
- [18] Matloob F, Ghazal TM, Taleb N, Aftab S, Ahmad M, Khan MA, et al., "Software defect prediction using ensemble learning: A systematic literature review," IEEE Access 2021; 9: 98754-98771.
- [19] Chazette L, Becker M, Szczerbicka H. "Basic algorithms for bee hive monitoring and laser-based mite control," in 2016 IEEE symposium series on computational intelligence (SSCI) 2016; 1-8.

- [20] Tashakkori R, Hernandez NP, Ghadiri A, Ratzloff AP, Crawford MB. "A honeybee hive monitoring system: From surveillance cameras to Raspberry Pis," in SoutheastCon 2017; 1-7.
- [21] Chen C, Yang EC, Jiang JA, Lin TT. "An imaging system for monitoring the in-and-out activity of honey bees," *Comput Electron Agric* 2012; 89: 100-109.
- [22] Chiron G, Gomez-Krämer P, Ménard M. "Detecting and tracking honeybees in 3D at the beehive entrance using stereo vision," *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2013; 2013: 1-17.
- [23] Tashakkori R, Ghadiri A. "Image processing for honey bee hive health monitoring," in SoutheastCon 2015, 2015; 1-7.
- [24] Boenisch F, Rosemann B, Wild B, Dormagen D, Wario F, Landgraf T. "Tracking all members of a honey bee colony over their lifetime using learned models of correspondence," *Frontiers in Robotics and AI*, 2018; 5: 35.
- [25] Magnier B, Ekszterowicz G, Laurent J, Rival M, Pfister F. "Bee hive traffic monitoring by tracking bee flight paths," in 13th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, January 27-29, 2018, in Funchal, Madeira, Portugal, 2018; 563-571.
- [26] Rodriguez IF, Megret R, Acuna E, Agosto-Rivera JL, Giray T. "Recognition of pollen-bearing bees from video using convolutional neural network," in 2018 IEEE winter conference on applications of computer vision (WACV) 2018; 314-322.
- [27] Yang J. "The beeimage dataset: Annotated honey bee images," Accessed: Aug 2018; 13: 2019.
- [28] Yoo J, Siddiqua R, Liu X, Ahmed KA, Hossain MZ. "BeeNet: An End-To-End Deep Network For Bee Surveillance," *Procedia Comput Sci* 2023; 222: 415-424.
- [29] Voudiotis G, Moraiti A, Kontogiannis S, "Deep Learning Beehive Monitoring System for Early Detection of the Varroa Mite," *Signals* 2022; 3: 506-523.
- [30] Nasser M, Yusuf UK. "Deep Learning Based Methods for Breast Cancer Diagnosis: A Systematic Review and Future Direction," *Diagnostics* 2023; 13: 161.
- [31] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. "Deep residual learning for image recognition," in Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016; 770-778.
- [32] Rezaei Z. "A review on image-based approaches for breast cancer detection, segmentation, and classification," *Expert Syst Appl* 2021; 182: 115204.
- [33] Zhuang X, Liu F, Hou J, Hao J, Cai X. "Transformer-based interactive multi-modal attention network for video sentiment detection," *Neural Process Lett* 2022; 54: 1943-1960.
- [34] Üzen H, Türkoğlu M, Yanikoglu B, Hanbay D. "Swin-MFINet: Swin transformer based multi-feature integration network for detection of pixel-level surface defects," *Expert Syst Appl* 2022; 209: 118269.
- [35] Cao H, Wang Y, Chen J, Jiang D, Zhang X, Tian Q, et al. "Swin-unet: Unet-like pure transformer for medical image segmentation," in European conference on computer vision, 2022; 205-218.
- [36] Yang J, "The BeeImage Dataset: Annotated Honey Bee Images | Kaggle." [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/jenny18/honey-bee-annotated-images>. [Accessed: 12-Mar-2023].
- [37] Tiryaki VM. "Mass segmentation and classification from film mammograms using cascaded deep transfer learning," *Biomed Signal Process Control* 2023; 84: 104819.
- [38] Nikzad-Khasmakhia N, Balafara M, Feizi-Derakhshia MR, Motamedb C. "BERTERS: Multimodal Representation Learning for Expert Recommendation System with Transformer," *arXiv preprint arXiv:2007.07229*, 2020.
- [39] Abdou MA. "Literature review: Efficient deep neural networks techniques for medical image analysis," *Neural Comput Appl* 2022; 34: 5791-5812.
- [40] Üzen H, Yeroğlu C, Hanbay D. "Development of CNN architecture for Honey Bees disease condition," in 2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), 2019; 1-5.
- [41] Rasp N, Rahm E, Lange L. "A Study on the Impact of Class Imbalance on CNNs for Bee Health Detection," 2022.



## Enhancing Structural Resilience: Exploring the Novel Sleeve Method for Steel T-Stub Connections

Muhammed ATAR<sup>1\*</sup>, Berat ÇETE<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Civil Engineering Department, Engineering Faculty, Firat University, Elazig, Türkiye

\*<sup>1</sup> matar@firat.edu.tr, <sup>2</sup> ceteberat23@gmail.com

(Geliş/Received: 01/11/2023;

Kabul/Accepted: 11/01/2024)

**Abstract:** A new sleeve device has been introduced with the aim of enhancing the performance of steel structures under extreme loading conditions. Previous research has primarily focused on numerical simulations of this sleeve's application, emphasizing the need for further investigation to validate its effectiveness. This research paper presents a numerical analysis that explores how the sleeve device influences the deformation capacity and strength of a bolt up to the point of failure. The study involved the use of a T-stub connection with multiple sleeves, each featuring different geometric parameters. To assess the impact on strength and deformation capacity, a comparison was drawn between these findings and the behavior of a T-stub bolted connection without using the sleeve. In addition, Finite Element (FE) models were employed for additional parametric studies. The test outcomes demonstrated a substantial increase in the deformability of the bolted connection when utilizing the sleeve device, all the while preserving the strength and initial stiffness of the bolts. This proposed sleeve method in the study significantly enhances the connection's capacity by delaying bolt failure.

**Key words:** Steel structures, T-stub connection, Steel sleeve, Bolted connection, Ductility.

### Yapısal Dayanıklılığın Artırılması: Çelik T-Bağlantılar İçin Yeni Çelik Manşon Yöntemi

**Öz:** Yeni bir çelik manşon methodu, çelik yapıların aşırı yüklenme koşullarında performansını artırmayı amaçlayan bir yöntem olarak tanıtılmıştır. Daha önceki araştırmalar genellikle bu manşon sisteminin uygulanmasıyla ilgili sonlu elemanlar yöntemi odaklı simülasyonlar ile çalışılmış ve etkililiğini doğrulamak için daha fazla araştırmanın gerekliliği vurgulanmıştır. Bu araştırma makalesi, yeni tanıtılan çelik manşon kullanım metodu ile bir civata üzerinde deformasyon kapasitesi ve dayanıklılığın nasıl etkilendiğini amaçlayan nümerik bir analiz sunmaktadır. Çalışma, farklı geometrik parametrelere sahip çelik manşon kullanılan bir T-profil bağlantısının kullanımını içermektedir. Dayanıklılık ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkiyi değerlendirmek için bu bulgular ile çelik manşon kullanılmadan T-profil bir bağlantının davranışı arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca, ilave parametrik çalışmalar için Sonlu Eleman modelleri kullanılmıştır. Araştırma sonuçları, çelik manşon kullanımı ile civatalı bağlantının deformasyon kapasitesinde belirgin artış gözlemlenmiş ve aynı zamanda civataların kendi dayanıklılığını ve başlangıç sertliğini korudukları görülmüştür. Bu çalışmada önerilen çelik manşon yöntemi, civatalı bağlantıların dayanıklılığını civata hasarını geciktirerek önemli ölçüde artırmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Çelik yapılar, T-profil bağlantısı, Çelik manşon, Civatalı bağlantı, Süneklik.

### 1. Introduction

The steel connection between beams and columns plays a critical role in transmitting various forces such as moment, shear force, axial force, and torque in a steel framework. It is crucial to maintain the integrity and flexibility of these connections to safeguard against both disproportionate and gradual structural failure, as emphasized by Khandelwal et al. [1] Connections are also essential for ensuring the stability and safety of steel structures, as highlighted by Kombate et al. [2]. For instance, a significant portion of failures in steel structures can be attributed to problems with connections, while the occurrences of failures in structural members are relatively rare [3]. In the construction of steel assemblies, the use of high-strength bolts in end-plate connections is the favored approach for beam-column joints. This preference stems from their significant ability to withstand deformation. The complexity of bolted connections arises from multiple nonlinear factors, including contact, geometry, and material properties, as well as the presence of numerous components. Consequently, it becomes necessary to employ approximations in the analysis of such connections. One common approximation in the study

\* Sorumlu yazar: [matar@firat.edu.tr](mailto:matar@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7812-0086, <sup>2</sup> 0009-0007-8670-8235

of steel bolted connections involves representing the tension side of the connection as an equivalent T-stub, as specified in the EN 1993-1-8 standard. The behavior of the T-stub model is influenced by various phenomena and factors. T-stubs play a crucial role in these end-plate connections and have a notable impact on the way these connections fail and their flexural performance [4]. Therefore, it is possible to simplify extended end-plate connections by modeling them as T-stubs. A T-stub comprises three key elements: a stem, a flange, and bolts. The stem is welded to the flange, and the T-stub is connected to a structural element using bolts. In this arrangement, the flanges handle bending loads, while the bolts are responsible for bearing the tension loads.

Many researchers have undertaken studies to examine the behavior of T-stub connections. For instance, Piluso and Rizzano [5] conducted experiments on T-stub joints exposed to cyclic loading and devised a theoretical equation that can predict the tensile strength curve when subjected to monotonic loading conditions. Tartaglia et al. conducted a comprehensive investigation, involving both experimental and numerical studies, to evaluate the influence of bolt types and initial imperfections in the presence of significant deformations [6]. In a separate study, Ghazanfar demonstrated that increasing the spacing between the bolt and the stem of a T-stub improves ductility but reduces resistance [7]. [8] Bezerra et al. carried out an experimental study on unstiffened T-stubs to examine the impact of the T-stub flange thickness on the performance of bolts when subjected to monotonic loading conditions. Swanson et al. studied a series of tests and finite element analyses to evaluate various aspects of T-stub connections, including their bearing capacity, initial stiffness, and deformation characteristics [9][10][11]. Swanson et al. [10] proposed a theoretical framework for predicting the rigidity and deformation characteristics of the T-stub model when it reaches a state of failure. Francavilla et al. examined the plastic deformation capability of a single-row bolted T-stub by employing the SAP2000 computer software [12]. Zhang et al. carried out an experiment focused on T-stub connections [13]. This study aimed to investigate their ultimate performance while taking into account the influence of different parameters. Furthermore, a plate-shell theory was used to estimate the tensile capacity and initial stiffness of these connections. Zaharia et al. carried out a full-scale test that included assessments of T-stub connections with single joint configurations [14]. Özkılıç conducted a comprehensive experimental investigation with the objective of analyzing the performance of stiffened T-stubs [15].

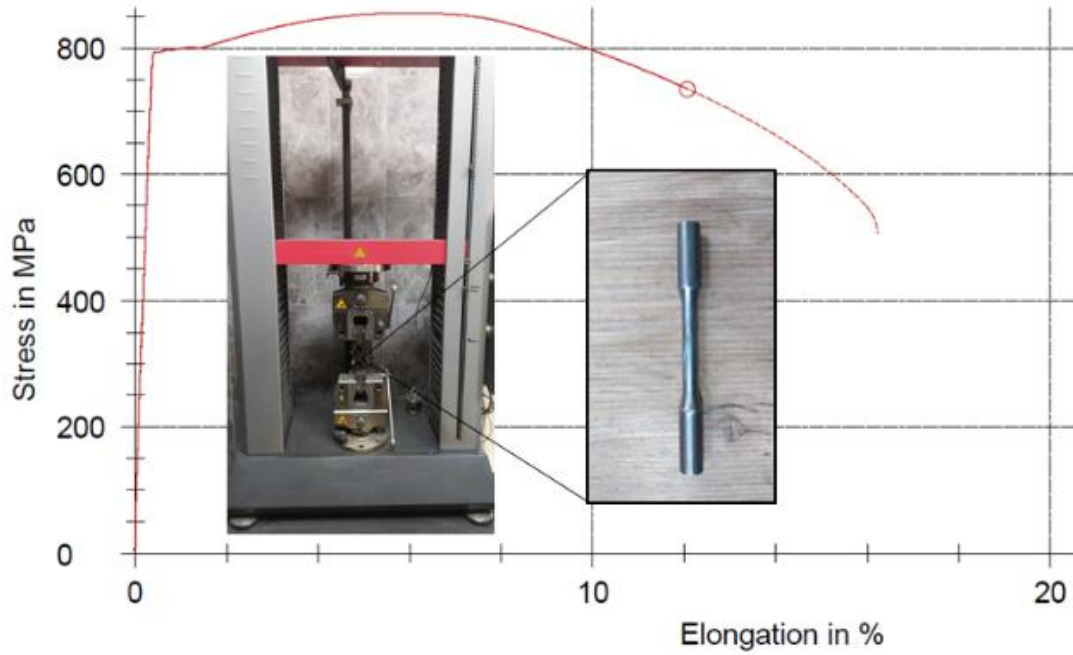
Simultaneously with the previously mentioned research on frame systems, there have also been studies focused on the development of different dissipative elements, commonly known as "fuse" elements. The introduction of these elements aimed to enhance the effectiveness of structural fuses and enhance the earthquake resistance of beam-column joints. Moreover, seismic connections often integrate structural "fuse" systems that are specifically designed to display ductile behavior, serving the purpose of dissipating energy and mitigating the destructive effects of earthquakes [16]. These fuse components experience plastic deformation ahead of the primary structural members, effectively containing any damage within the fuses and preserving the integrity of the primary structural elements. Although the idea of incorporating fuses is a common practice in steel beam-column connections, its practical implementation is often constrained [17]. The reason for this limitation is that introducing fuses in connections may require alterations to the columns and beams, which are typically not approved or accepted in standard construction practices [18]. Shaheen et al. have recently introduced a novel method that employs steel sleeves to improve the rotational capacity of end plate connections [19]. This technique is primarily centered on enhancing the effectiveness of bolts, leading to an overall improvement in the performance of the connection. During scenarios involving distinct extreme loading conditions, this system has the capacity to considerably diminish the expenses associated with repairs since any damage would be isolated to the sleeve without impacting the integrity of the steel beam. The innovative sleeve technique has been utilized in various connection situations, encompassing progressive collapse mechanisms [20], connections between end plates and beam columns [21], additionally, connections involving base plate anchor rod attachments [22]. It's important to highlight that the majority of published research in this area has predominantly consisted of numerical analyses, with limited comprehensive experimental testing to substantiate and illustrate the practical viability of the sleeve concept.

The current study introduces an innovative sleeve system aimed at enhancing the deformation capacity of T-stub connections. In this system, the suggested sleeve element is positioned between the plate and the bolt washer. This unique design enables the sleeves to serve as structural fuses in situations of severe loading, containing any damage within the sleeves and preventing the plastic deformation of other structural elements. After a damaging event, these sleeves can be readily replaced. This inventive sleeve system can also serve as a practical and economically efficient retrofitting solution to improve the performance of pre-existing steel structure connections. The current study is particularly centered on T-stub connections featuring thick plates, where the integrity of bolts is pivotal in determining failure. To assess its behavior, the research utilizes a finite element (FE) model, enabling a comprehensive parametric analysis.

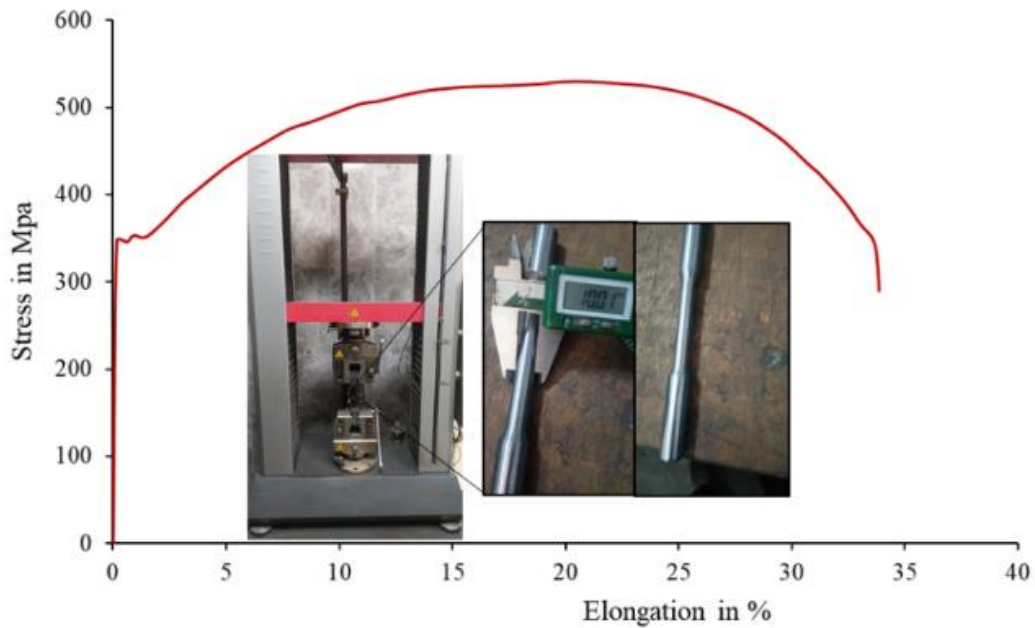


## 2. System Description and Material Testing

The experimental study employed two different testing setups. In the initial round of experiments, the primary aim was to assess the capacity of bolts under tension. To achieve this goal, a coupon test was conducted to gather data on the material properties of the bolt component, specifically using M20, 8.8 grade bolts for this investigation. In the subsequent series of experiments, the material of the sleeve rod underwent a standard tensile test. The data and material properties obtained were specifically collected for their application in Finite Element Analysis (FEA) study. The standard tensile tests were conducted on two 15 mm diameter specimens made from both sleeve and bolt materials, and the stress-strain curves from these tests are detailed in Figure 1.



(a) Bolt coupon tensile test



(b) Sleeve coupon tensile test

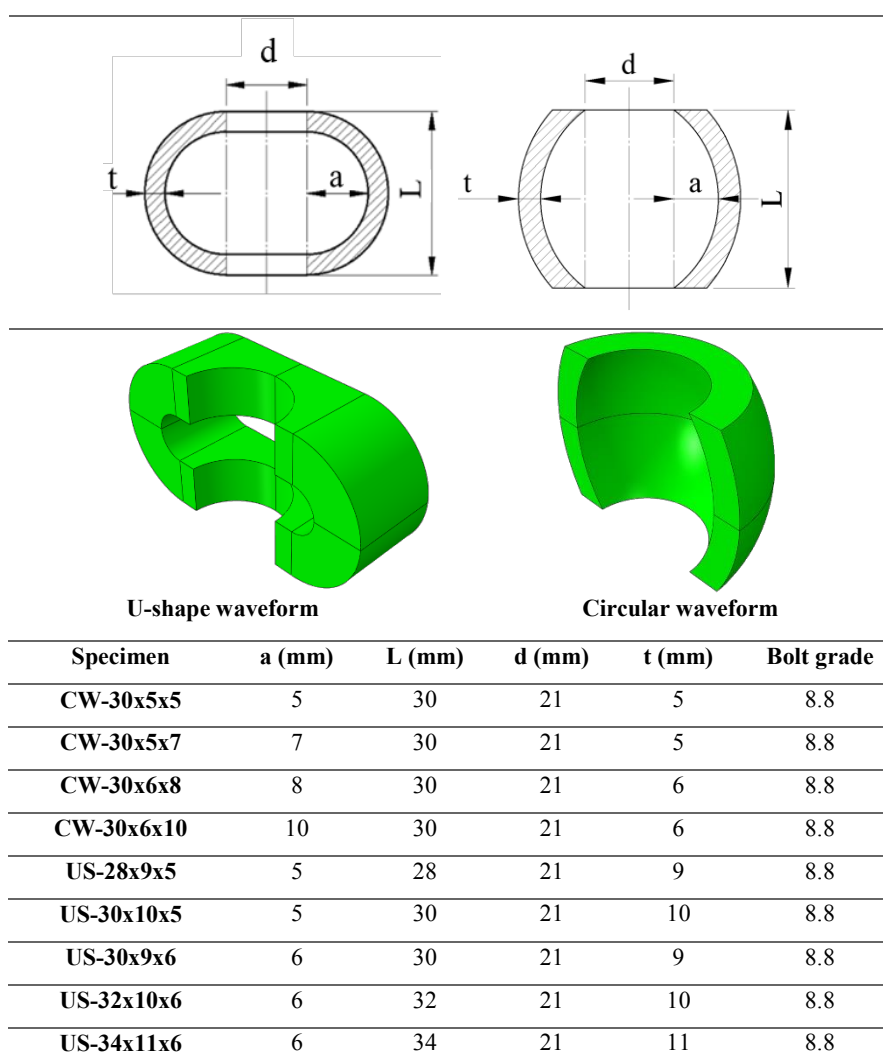
**Figure 1.** A presentation of the standart tensile test result of bolt and sleeve coupon

It's worth noting that this study involves two different types of sleeves, referred to as circular waveform (CW) and U-shape (US) waveform sleeves. In Table 1, the detail of geometric specifications for the proposed sleeve samples is given, and Figure 2 provides a comprehensive overview of the sleeved models. The specimen labels provide valuable information about the unique features of each individual sample. The parameters describing the geometric features of the sleeve can be ascertained through the formulas outlined by Shaheen et al. [21]. To enhance the ductility of the connection, it is crucial for bending deformation to occur in the sleeve before any connection components fail. This goal can be achieved by ensuring that the sleeve's capacity is lower than the force in the bolt at the point of failure [21]. Consequently, the initial design of the connection should follow conventional methods for calculating the bolt force at failure. Subsequently, the dimensions of the sleeve are determined based on this calculated bolt force. For example, if bolt necking is identified as the predominant failure mode, the sleeve must be designed with an ultimate capacity lower than that of the bolt, allowing the sleeve to undergo plastic deformation before the bolt fails.

**The wave form of sleeve –  $L \times t \times a$**   
**CW:** Circular waveform – The sleeve length x The sleeve thickness x The amplitude value  
**US:** U – shape waveform – The sleeve length x The sleeve thickness x The amplitude value

**Figure 2.** Specimen identification

**Table 1.** Geometric characteristic of tested specimens



The proposed and sleeve system designed for the T-stub connection is illustrated in Figure 4. This sleeve is positioned between the T-stub and the bolt's washer and can be characterized by its geometric attributes, such as its length, thickness, and the curvature of its walls. The sleeve takes on a shape resembling a barrel, engineered to withstand applied loads by distributing stress through a combination of membrane and bending forces. To prevent immediate buckling of the sleeve's walls and promote bending failure, the walls are intentionally curved. The extent and shape of this curvature are determined by the amplitude and waveform of the sleeve. While theoretically, any waveform configuration could be applied to the sleeve design, the ideal waveform should offer the best structural performance at the lowest manufacturing cost.

The material chosen for the fixed base and T-stub plate matches the S355 steel grade used for the sleeve material. Given that the objective of the study is to investigate bolt failure and evaluate the impact of the proposed sleeve method, a T-stub with a thick plate and a fixed base stub, as described in Liu et al. [23], has been selected. Figures 3 and 4 provide three-dimensional representations of the modeled T-stub and present essential geometric properties of the connection assembly.

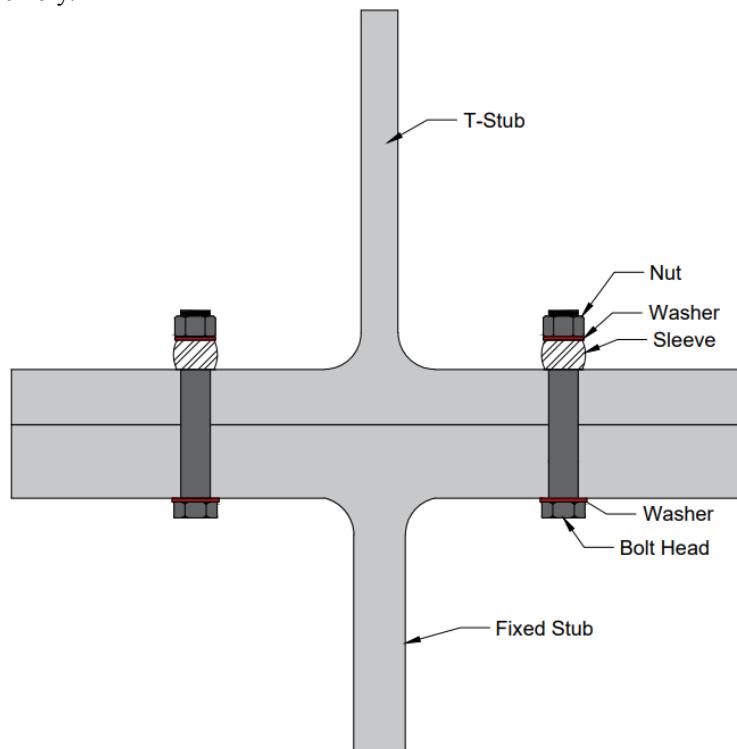


Figure 3. T-stub,bolt and sleeve assembly

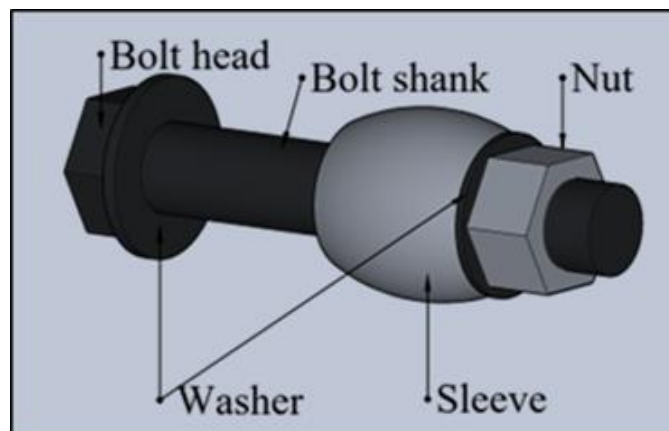


Figure 4. A presentation of the proposed bolt and sleeve assembly

### 3. Numerical Model Development

A 3D finite element analysis (FEA) model of the T-stub connection was generated using ABAQUS/CAE, as depicted in Figure 6. Initially, the bolt model was created in finite element modeling, and the results of the bolt exposed to tension force were compared to the experimental coupon test of the bolt material. The results detailed in Figure 5 demonstrate a close match between the results. After that, the FEA model was designed to represent one-quarter of the T-stub connection, taking advantage of the symmetry in both the specimen's shape and boundary conditions (see Figure 6). Symmetrical boundary conditions were applied at the central point of the model. The T-stub model was subjected to displacement until the bolt element failed, while restricting movement of the base stub in all directions. Solid elements (C3D8R) were used to discretize all components of the system. The Abaqus implicit solver was employed to analyze a nonlinear model that considered both geometric and material nonlinearity. Additionally, parts prone to experiencing high stress concentrations, such as sleeves, were allocated a fine mesh of 2 mm, while parts located away from critical zones, like the bolts, T-stem and flange (5 mm), were assigned a coarse mesh. A mesh convergence study was performed to determine the suitable mesh size.

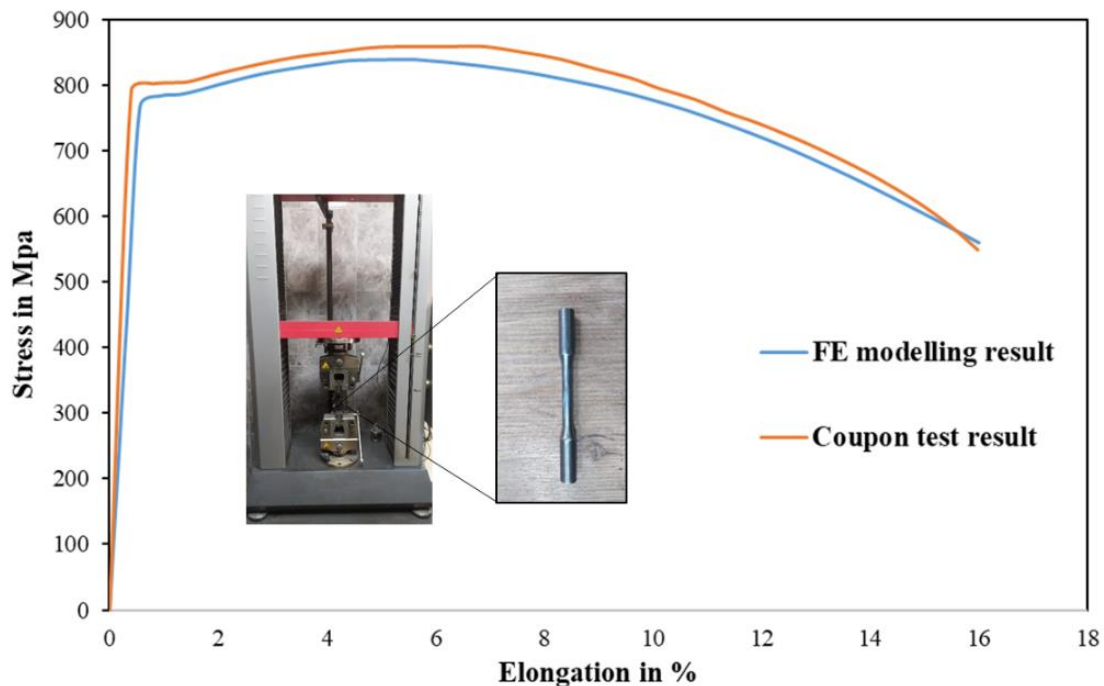
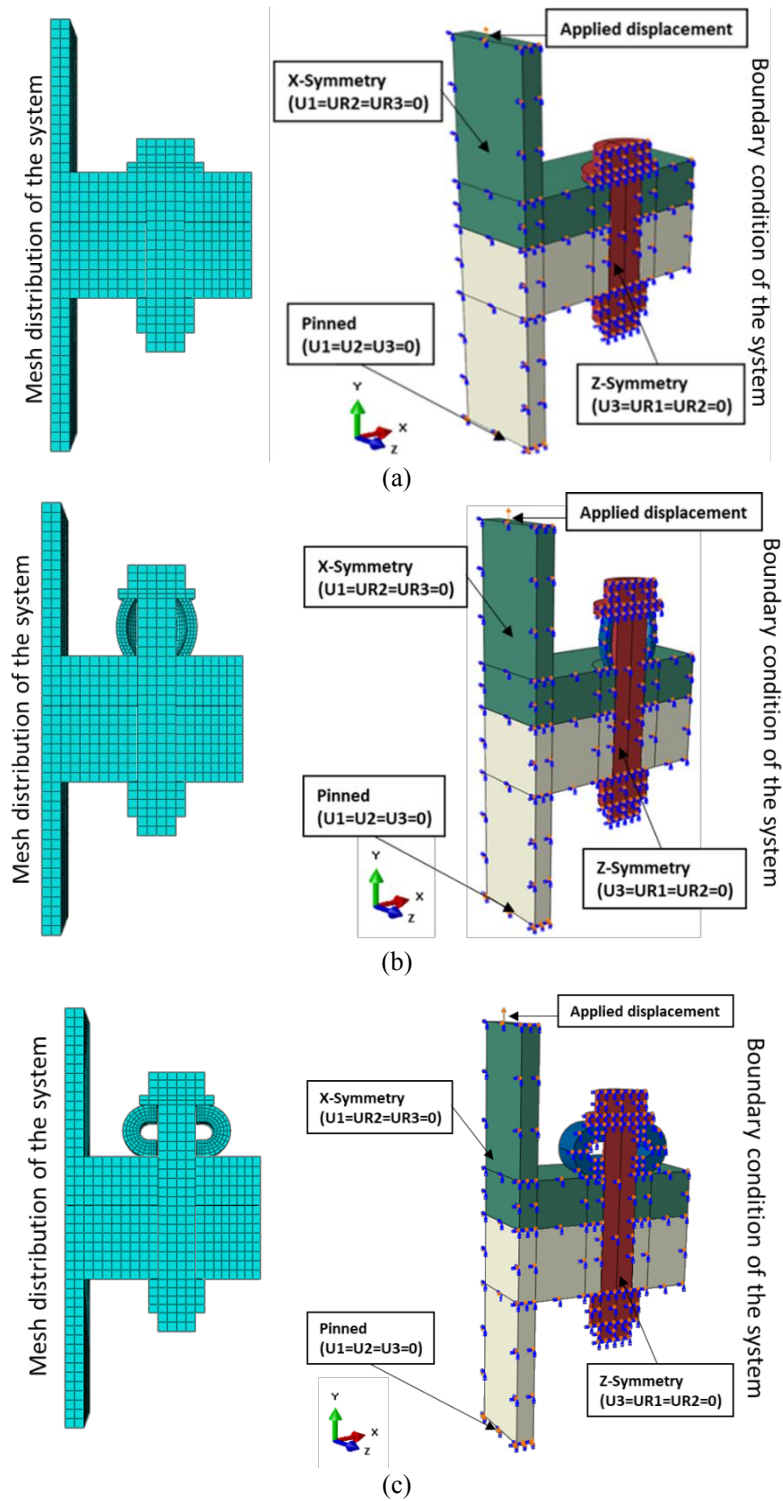


Figure 5. FE model and and coupon test results comparison

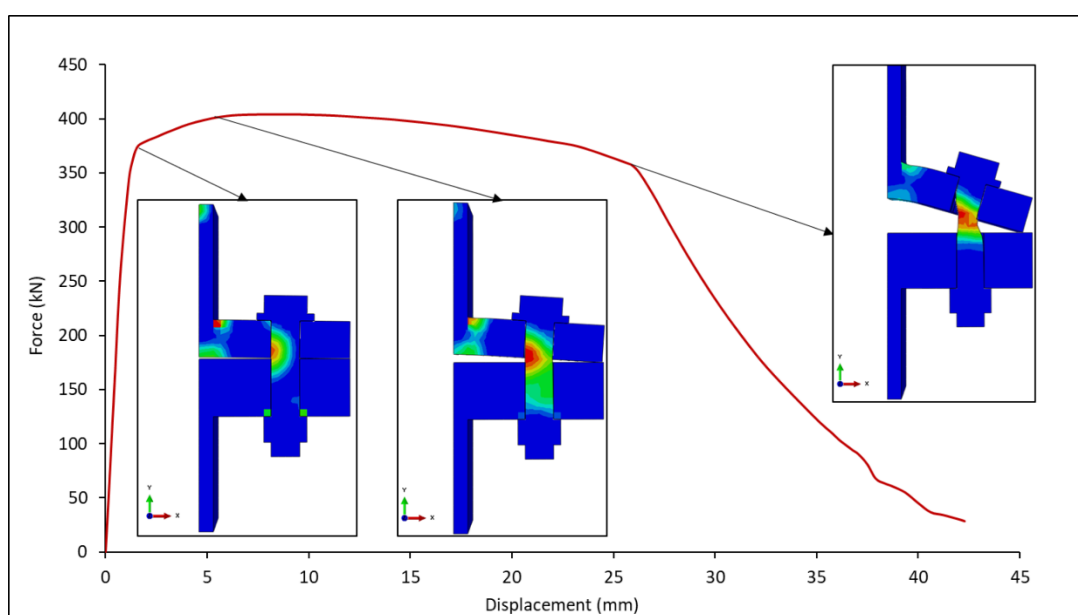
A surface-to-surface interaction was applied for all the necessary components in the model, employing a friction coefficient of 0.2 [24]. More specifically, the connections between the bolt and nut, as well as between the nut and washer, as monolithic surfaces, ensuring that they remained intact throughout the analysis. Similarly, since there were no instances of crack deformations in the welds during testing, the junction between the T-stub and the plate was likewise considered as a continuous connection. The material's mechanical response was described using a bilinear von Mises yield criterion with isotropic hardening. In addition, the ABAQUS/Standard incorporated ductile damage models to address material damage and fracture specifically in the bolts. However, T-stub and fixed-stub were excluded from the material damage criteria, as they showed no signs of damage in the conducted tests.



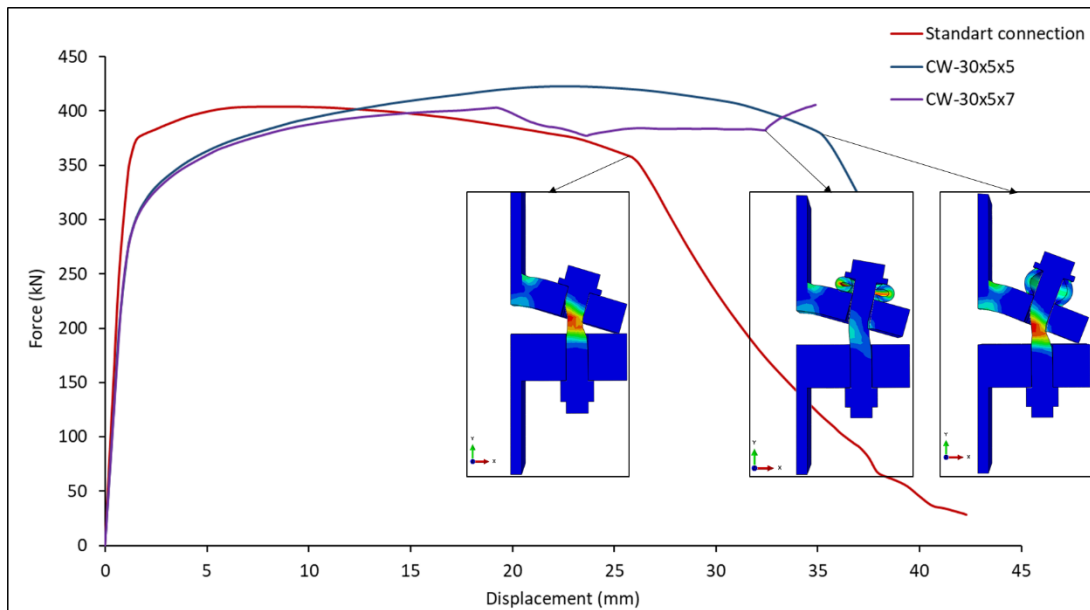
**Figure 6.** FE model and boundary condition of the T-stub connection (a) without sleeve (b) with CW sleeve and (c) with U-shape sleeve

#### 4. Results and Discussion

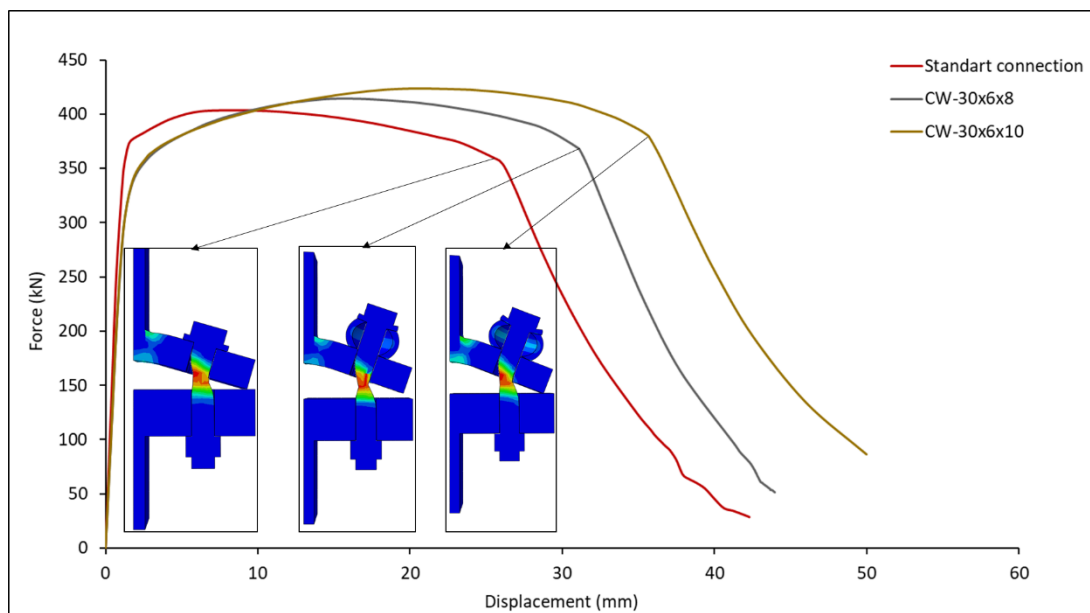
This section examines the performance of T-stub connections, comparing those with and without the suggested sleeve system. Table 1 offers comprehensive information regarding the dimensions and characteristics of these sleeves. As mentioned earlier, two types of sleeves were introduced to improve the connection's ability to bear loads. Figure 7 displays the force-displacement behavior of the standard T-stub connection, highlighting different stages of bolt failure. It's apparent that the bolt fails entirely at around 25 mm of displacement. The primary objective in the design of both the T-stub and base stub was to prevent any occurrence of plastic deformation, with a primary emphasis on monitoring potential damage to the bolt. Figure 8 and 9 provides a visual representation of the force-displacement characteristics of T-stub connections when subjected to tensile loading, offering a comparison between the CW-sleeved and conventional configurations. It is noteworthy that a substantial enhancement in load-bearing capacity is apparent for both the CW-sleeved systems with 5 mm and 7 mm amplitudes with thickness of 5 mm. The initial rigidity of the proposed sleeve system closely aligns with that of the standard configuration across all amplitude values. The capacity for displacement is notably influenced by the selected amplitude, where the utilization of 5 mm amplitudes results in an approximate 40% increase in the displacement ratio when compared to the standard connection. In the instance of the CW-30x5x7 sleeved configuration, it is observed that the sleeves experience complete deformation before the bolt itself fails, typically occurring at a displacement of approximately 33 mm which increase the deformation capacity more than 100%. This observation indicates that the plastic amplitude (PA), which signifies that the sleeve has reached its maximum load-bearing capacity, has been observed, and the initiation of bolt failure has commenced. Further investigations were conducted with a sleeve thickness of 6 mm, where none of the configurations experienced a complete crush of the sleeve, as depicted in Figure 9. The results suggest that the optimum sleeve thickness for the proposed T-stub tests may be 5 mm for CW sleeve type.



**Figure 7.** Force-displacement response of the standart T-stub connection and failure of the bolt



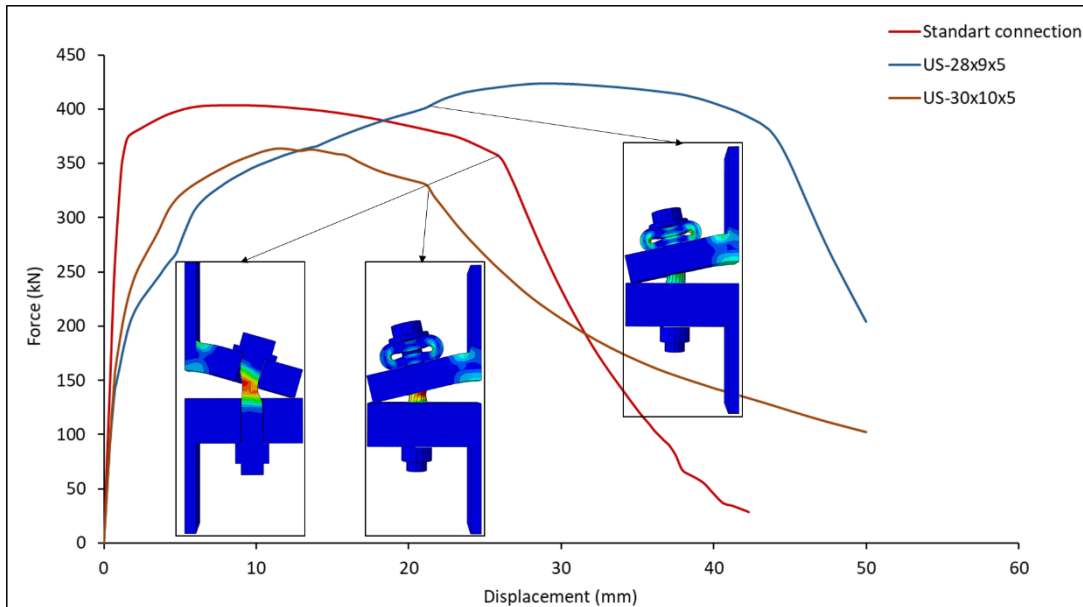
**Figure 8.** Force-Displacement response of the base plate with circular waveform sleeves of length 30 mm and various amplitudes.



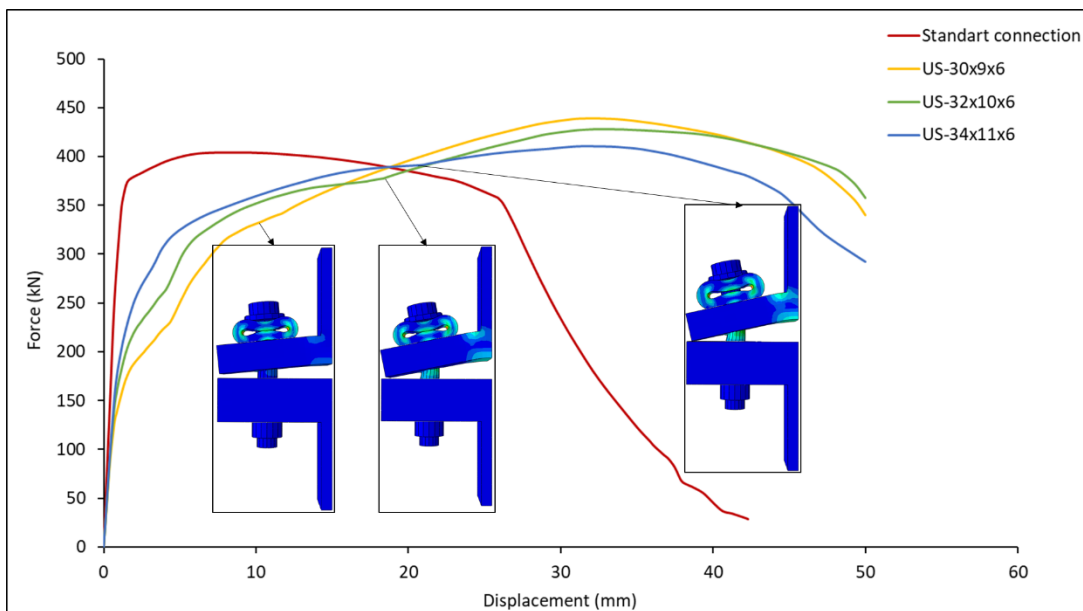
**Figure 9.** Force-Displacement response of the base plate with circular waveform sleeves of length 30 mm, thickness 6 mm and various amplitudes.

A further comparative analysis was conducted to evaluate the performance of load-bearing capacity between the US-sleeved and standard configurations when subjected to tensile loading (as depicted in Figure 10 and 11). Although the initial rigidity of the proposed sleeve system is not entirely similar with that of the standard configuration for various thickness values, a substantial enhancement in displacement capacity of approximately 80% is observed. In the case of utilizing sleeve configurations with thicknesses of 9 mm, 10 mm and 11 mm, all featuring a 6 mm amplitude, it is noteworthy that the enhancement in displacement capacity follows a similar pattern. However, it is important to note that only the US-30x9x6 sleeve model attains its maximum capacity prior to any plastic deformation occurring in the bolt. This occurrence signifies the observation of the plastic amplitude (PA) and the subsequent initiation of bolt failure, which begins after the sleeve experiences complete deformation. Conversely, the US-30x10x6 and US-30x11x6 sleeve configurations witness bolt failure before the sleeve reaches

a state of complete deformation, suggesting that the sleeve's total load-bearing capacity was not fully achieved. In addition, the US-28x9x5 sleeved bolted model increased the deformation capacity almost 80% compared to the standart connection. However, it should also be noted that the US-28x9x5 and US-30x10x5 sleeve configurations were analyzed, and the PA observation was not observed, as premature failure of the bolt occurred before the complete crushing of the sleeve models. This phenomenon suggests that the optimum sleeve design should be more specifically investigated.



**Figure 10.** Force-Displacement response of the base plate with u-shape waveform sleeves of 5 mm amplitude and various thicknesses.



**Figure 11.** Force-Displacement response of the base plate with u-shape waveform sleeves of 6 mm amplitude and various thicknesses.



## 5. Conclusion

The primary aim of this research is to assess the performance of a recently developed sleeve system specifically designed for steel T-stub connections subjected to tensile loading conditions. The study encompasses both modeling and a comprehensive parametric analysis, involving two distinct sleeve geometries: circular (CW) and U-shaped (US) waveforms. The investigation explores a range of geometric parameters, encompassing aspects such as length, thickness, and amplitude. The objective of the study was to compare the findings with those obtained from a standard connection, with a focus on evaluating the displacement capacity of the proposed system. The research results suggest that the proposed system effectively improves the load-bearing capacity of T-stub connections in comparison to the standard connection. To summarize, the study's ultimate conclusion is that the proposed sleeve system is effective for both circular (CW) and U-shaped (US) geometries, leading to enhanced connection performance. The research presented in this paper yields the following key conclusions:

- The effectiveness of an innovative sleeve system, featuring various geometries, has been substantiated through numerical parametric investigations applied to a practical case study.
- For connections utilizing circular waveform sleeves, a significant resemblance in linear elastic behavior to that of standard connections was observed. Furthermore, connections with these sleeves demonstrated an enhanced displacement capacity with increasing amplitude. Notably, it was found that at a specific amplitude value, sleeve deformation could happen before the failure of the bolt.
- In the comparison of US waveform sleeves to the standard connection, a distinct difference was evident in their elastic behavior. Initial stiffness degradation, particularly on the negative side, was notable. Nevertheless, with an increase in amplitude, a substantial enhancement in displacement capacity became apparent.
- By adjusting the parameters of the sleeves, it is possible to attain varying ductile responses without the necessity of modifying the connection's strength or configuration. The proposed system provides a straightforward and cost-effective method to improve the resilience of current structures when subjected to a range of loads.

## Acknowledgement

I would like to acknowledge that this study originated from the thesis prepared by Berat Çete in the Civil Engineering Master's Program at Firat University.

## References

- [1] Khandelwal, K., & El-Tawil, S. (2007). Collapse behavior of steel special moment resisting frame connections. *Journal of Structural Engineering*, 133(5), 646-655.
- [2] de la Croix Kombate, T.J. and Taşkın, K., 2022. State-of-the-art review on the behaviour of T-stubs and prying action. *Journal of Constructional Steel Research*, 191, p.107203.
- [3] Segui, W.T., 2012. *Steel design*. Cengage Learning. Eurocode C. 3: Design of steel structures, part 1-8: Design of joints (2005) Brussels: EN1993-1-8, European Committee for Standardization
- [4] Dinu, F., Dubina, D., Marginean, I., Neagu, C., & Petran, I. (2015). Axial strength and deformation demands for T-stub connection components at catenary stage in the beams. In 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (pp. 623-630).
- [5] Piluso, V., & Rizzano, G. (2008). Experimental analysis and modelling of bolted T-stubs under cyclic loads. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(6), 655-669.
- [6] Tartaglia, R., D'Aniello, M., & Zimbru, M. (2020, October). Experimental and numerical study on the T-Stub behaviour with preloaded bolts under large deformations. In *Structures* (Vol. 27, pp. 2137-2155). Elsevier.
- [7] Anwar, G. A. (2017). Ultimate deformation and resistance capacity of bolted T-Stub connections under different loading conditions (Master's thesis, České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.)
- [8] Bezerra, L. M., Bonilla, J., Silva, W. A., & Matias, W. T. (2020). Experimental and numerical studies of bolted T-stub steel connection with different flange thicknesses connected to a rigid base. *Engineering structures*, 218, 110770.
- [9] Swanson, J. A., & Leon, R. T. (2000). Bolted steel connections: tests on T-stub components. *Journal of Structural Engineering*, 126(1), 50-56.
- [10] Swanson, J. A., & Leon, R. T. (2001). Stiffness modeling of bolted T-stub connection components. *Journal of structural engineering*, 127(5), 498-505.
- [11] Swanson, J. A., Kokan, D. S., & Leon, R. T. (2002). Advanced finite element modeling of bolted T-stub connection components. *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5-8), 1015-1031.

- [12] Francavilla A.B., Latour M., Piluso V., Rizzano G. Simplified finite element analysis of bolted T-stub connection components Eng. Struct., 100 (2015), pp. 656-664
- [13] Zhang, Y., Gao, S., Guo, L., Qu, J. and Wang, S., 2022. Ultimate tensile behavior of bolted T-stub connections with preload. Journal of Building Engineering, 47, p.103833.
- [14] Zaharia, R., & Dubina, D. (2006). Stiffness of joints in bolted connected cold-formed steel trusses. Journal of constructional steel research, 62(3), 240-249.
- [15] Özkılıç, Y. O. (2021). The capacities of thin plated stiffened T-stubs. Journal of Constructional Steel Research, 186, 106912.
- [16] Wang, M., Zhang, C., Sun, Y., & Dong, K. (2022). Seismic performance of steel frame with replaceable low yield point steel connection components and the effect of structural fuses. Journal of Building Engineering, 47, 103862.
- [17] Trautner, C., Hutchinson, T., Grosser, P., Piccinin, R., & Silva, J. (2019). Shake table testing of a miniature steel building with ductile-anchor, uplifting-column base connections for improved seismic performance. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 48(2), 173-187.
- [18] Inamasu, H., Sousa, A. A., Bartrina, G. G., & Lignos, D. (2019, September). Exposed Column Base Connections for Minimizing Earthquake-induced Residual Deformations in Steel Moment-Resisting Framess. In [Proceedings of the SECED 2019 Conference] (No. CONF).
- [19] Shaheen, M. A., Foster, A. S., & Cunningham, L. S. (2020, December). A novel device to improve robustness of end plate beam-column connections. In Structures (Vol. 28, pp. 2415-2423). Elsevier.
- [20] Shaheen, M. A., Atar, M., & Cunningham, L. S. (2023). Enhancing progressive collapse resistance of steel structures using a new bolt sleeve device. Journal of Constructional Steel Research, 203, 107843.
- [21] Shaheen, M. A., Foster, A. S., & Cunningham, L. S. (2022). A novel device to improve robustness of end plate beam-column connections: Analytical model development. Thin-Walled Structures, 172, 108878.
- [22] Shaheen, M. A., Tsavdaridis, K. D., Ferreira, F. P. V., & Cunningham, L. S. (2023). Rotational capacity of exposed base plate connections with various configurations of anchor rod sleeves. Journal of Constructional Steel Research, 201, 107754.
- [23] Liu, M., Zhu, X., Wang, P., Tuoya, W., & Hu, S. (2017). Tension strength and design method for thread-fixed one-side bolted T-stub. Engineering Structures, 150, 918-933.
- [24] European Committee for Standardization (CEN). NS-EN 1090-2:2008 +A1:2011, execution of steel structures and aluminum structures – part 2: technical requirements for steel structures: Norwegian Standard; 2008.

## ResNet Tabanlı PSPNet Kullanarak Panoramik Görüntülerde Gömülü Diş Segmentasyon Analizi

Meryem DURMUŞ<sup>1\*</sup>, Burhan ERGEN<sup>2</sup>, Adalet ÇELEBİ<sup>3</sup>, Muammer TÜRKÖĞLU<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Uzaktan Eğitim, Uygulama ve Araştırma Merkezi, Rektörlük, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Ağız, Diş ve Çene Cerrahisi Anabilim Dalı, Diş Hekimliği Fakültesi, Mersin Üniversitesi, Mersin, Türkiye

<sup>4</sup> Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye

\*<sup>1</sup>meryem.durmus@samsun.edu.tr, <sup>2</sup>bergen@firat.edu.tr, <sup>3</sup>adalet\_celebi@hotmail.com,

<sup>4</sup>muammer.turkoglu@samsun.edu.tr

(Geliş/Received: 14/12/2023;

Kabul/Accepted: 13/02/2024)

**Öz:** Diş sağlığı, genel sağlık ve yaşam kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gömülü dişlerin segmentasyonu, diş hekimliğinde erken teşhis ve tedavi için kritik öneme sahip bir adımdır. Bu çalışmada, panoramik diş görüntülerindeki gömülü dişlerin doğru bir şekilde tanımlanması amacıyla derin öğrenme tekniklerinin kullanılması ele alınmıştır. Bu kapsamda, gömülü diş segmentasyonu için ResNet omurga ağına dayalı Piramit Sahne Ayrıştırma Ağı (PSPNet) geliştirilmiştir. Önerilen mimaride, önceden eğitilmiş ResNet omurga ağının ResNet18, ResNet34, ResNet50, ResNet101 ve ResNet152 versiyonları adapte edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular göz önüne alındığında, diş görüntülerindeki segmentasyon ve tanıma süreçlerinde en yüksek başarıyı ResNet18 modeli ile elde edilmiştir (%92.09 F1 Skor, %93.88 Kesinlik, %90.39 Duyarlılık, %85.34 IoU Skor ve %96.89 Dice Katsayısı). Bu araştırma, panoramik diş görüntüleri üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, yetişkin hastalarda gömülü dişlerin başarıyla tespit edilme oranının yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, yapay zekanın diş hekimleri için etkili bir yardımcı araç olabileceğini vurgulamakta ve sağlık sektöründeki yapay zeka gelişimine olan güveni artırmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Gömülü diş tespiti, derin öğrenme, ağız sağlığı, ResNet, PSPNet.

### Impacted Tooth Segmentation Analysis in Panoramic Images Using ResNet Based PSPNet

**Abstract:** Dental health has a significant impact on overall health and quality of life. Segmentation of impacted teeth is a critical step for early diagnosis and treatment in dentistry. In this study, we investigate the use of deep learning techniques to accurately identify impacted teeth in panoramic dental images. In this context, a Pyramid Scene Segmentation Network (PSPNet) based on ResNet backbone network is developed for embedded tooth segmentation. In the proposed architecture, ResNet18, ResNet34, ResNet50, ResNet101 and ResNet152 versions of the pre-trained ResNet backbone network are adapted. Considering the findings obtained in this study, the ResNet18 model achieved the highest success in segmentation and recognition processes in dental images (92.09% F1 Score, 93.88% Precision, 90.39% Recall, 85.34% IoU Score and 96.89% Dice Coefficient). This research reveals that the rate of successful detection of impacted teeth in adult patients is high as a result of studies on panoramic dental images. These findings emphasize that AI can be an effective tool for dentists and increase confidence in the development of AI in the healthcare sector.

**Key words:** Impacted tooth detection, deep learning, oral health, ResNet, PSPNet.

#### 1. Giriş

Diş tespiti, modern diş hekimliğinde önemli bir rol oynamakta ve sağlık sektöründe tanı yöntemlerinin gelişmesine öncülük etmektedir [1]. Geleneksel diş hekimliği uygulamalarında röntgen görüntüleme, hastaların ağız sağlığı durumunu değerlendirmede kritik bir araç olarak kabul edilmektedir. Ancak, bu görüntülerin hızlı ve doğru bir şekilde analiz edilmesi, zaman ve uzmanlık gerektiren bir süreçtir [2]. Yapay zekâ ve görüntü işleme teknolojilerinin gelişimi, diş tespiti alanında önemli ilerlemeler sağlamaktadır. Bu teknolojiler, oral röntgen görüntülerini otomatik olarak analiz ederek, diş yapılarını tespit etme ve değerlendirme yetenekleriyle diş hekimlerine önemli destek sağlamaktadır [3].

Diş tespiti, derin öğrenme modelleri ile özellikle büyük veri kümelerinin eğitilmesi sayesinde gelişmiş hassasiyet ve özgüllük sağlamaktadır. Bu teknolojiler, çeşitli diş sorunlarını tespit etme ve teşhis etme konusunda

\* Sorumlu yazar: [meryem.durmus@samsun.edu.tr](mailto:meryem.durmus@samsun.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-0558-2260, <sup>2</sup> 0000-0003-3244-2615, <sup>3</sup> 0000-0003-2471-1942, <sup>4</sup> 0000-0002-2377-4979

yetenekli olup, diş hekimlerinin daha etkili ve hızlı kararlar almasına olanak tanınmaktadır. Bu gelişmeler, hasta bakımının iyileştirilmesi ve tedavi süreçlerinin optimize edilmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır [4]. Bu bağlamda, yapay zekâ destekli diş tespiti, diş hekimlerinin hasta odaklı bakım standartlarını yükseltmek ve sağlık endüstrisindeki dönüşümü hızlandırmak adına önemli bir potansiyele sahiptir.

Erken teşhis, tedavi başarısı ve maliyet etkinliği açısından diş problemlerinin önemli olduğu bilinmektedir. Gömülü dişler gibi anatomik bozuklukların ve diş problemlerinin tespiti, diş sağlığı açısından önem arz etmektedir. Diş sağlığı alanında, diş hekimleri geleneksel olarak diş problemlerini teşhis etmek için görsel muayene, radyografi ve diğer tanı yöntemlerine başvururlar. Ancak, bu yöntemler zaman alıcı olabilir ve öznel değerlendirmelere dayanabilir. Bu sebeple, panoramik diş görüntüleri, özellikle gömülü dişler gibi karmaşık durumların tespitinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu geniş açılı görüntüler, detaylı bir anatomik değerlendirme sağlayarak erken teşhisi kolaylaştırabilir ve tedavi planlamasına değerli bilgiler ekleyebilir [5].

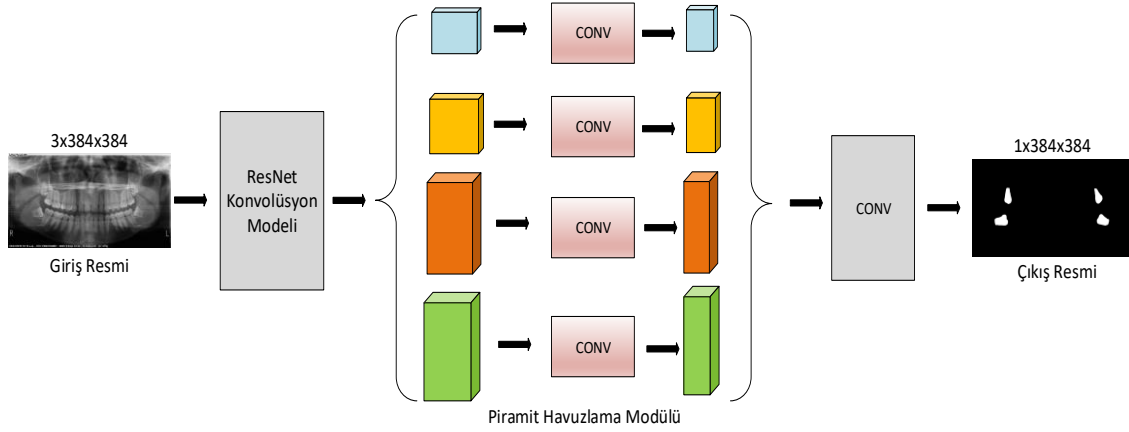
Dişin çene kemiği içinde doğru bir şekilde tespit edilmesi, tedavi planlaması ve olası komplikasyonların önlenmesi açısından önemli olduğu bilinmektedir. Derin öğrenme algoritmaları, özellikle ResNet tabanlı PSPNet gibi ağ yapıları, gömülü dişlerin hassas bir şekilde tespit edilmesini sağlayabilir ve bu da diş hekimliği pratiğinde önemli bir avantaj sağlayabilir. ResNet mimarileri, farklı derinlik seviyelerindeki öğrenme bloklarını içeren ve öğrenme sürecindeki kaybolan gradyan problemini (vanishing gradient problem) azaltan yapısıyla bilinmektedir. PSPNet ise piksel düzeyinde segmentasyon yapabilen ve çok ölçekli öznitelik bilgisi kullanarak nesne sınıflandırmasını gerçekleştirebilen bir ağ yapısı olarak öne çıkmaktadır [6].

Yapay zekâ algoritmaları, diş tespiti alanında önemli bir ilerleme sağlamaktadır. Özellikle çeşitli diş hastalıklarının teşhisinde, panoramik röntgen görüntüleri üzerinde yapay zekâ destekli analizler, hastaların erken tanı almasına ve tedavi sürecini hızlandırmasına olanak sağlamaktadır. Diş hastalıklarının erken teşhisi, genel sağlık durumu ve yaşam kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Mevcut literatürde, diş hastalıklarının teşhisi üzerine birçok çalışma bulunmakla birlikte, özellikle gömülü dişlerin teşhisi üzerine sınırlı sayıda araştırma yapılmıştır [7-10]. Chen ve ark., çalışmalarında TensorFlow ile Faster R-CNN kullanarak diş röntgenlerinde diş tespiti ve numaralandırma yapmışlardır. Faster R-CNN'in bu alandaki tercih edilen model olduğunu ve önerilen post-processing tekniklerinin başarıyla kullanıldığını savunmuşlardır. %90 üzerinde hassasiyet ve duyarlılık elde etmişlerdir [11]. Kuwada ve ark., panoramik görüntülerde gömülü dişleri tespit etmek için Evrişimli Sinir Ağları (CNN) uygulayarak maksiller sinüs (maxillary sinüs) lezyonları ve gömülü üçüncü azı dişlerinin ve anatomik yapılarla olan ilişkilerinin tespitinde yüksek doğruluk elde etmişlerdir. Üç farklı modelle deneyler yaparak %96 ile en yüksek doğruluğu DetectNet ile elde etmişlerdir [12]. Imak ve ark., derin evrişimli sinir ağları kullanarak panoramik diş görüntülerinde gömülü dişlerin tespiti için U-net modeli geliştirmişlerdir. Önerdikleri yöntem %99,82 doğruluk, %91,59 F1 Skor, %84,48 IoU Skor ve %90,71 oranlarında Duyarlılık değerlerini elde etmişlerdir [13].

Derin öğrenme teknikleri, diş hekimlerine diş tespiti ve gömülü dişlerin hızlı ve hassas belirlenmesinde yardımcı olurken, aynı zamanda hataların en aza indirgenmesine olanak sağlamaktadır. Derin öğrenme ile geleneksel yöntemlere kıyasla, görüntülerin derinlemesine analizi daha hızlı gerçekleştirilmektedir. Derin öğrenme teknikleri, gömülü dişler gibi karmaşık durumları daha doğru bir şekilde tanımlayabilir, böylece hekimlerin tedavi planlarını daha etkili bir şekilde geliştirmelerine yardımcı olabilmektedir. Bu çalışma, diş segmentasyonu için farklı model mimarilerinin performanslarını değerlendirmiştir. PSPNet mimarisi ve ResNet (ResNet18, ResNet34, ResNet50, ResNet101 ve ResNet152) omurga ağları, diş görüntülerindeki segmentasyon ve tanıma süreçlerindeki başarılarını değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

## 2. Metodoloji

Bu çalışmada, gömülü diş segmentasyonu için ResNet omurga ağına dayalı Piramit Sahne Ayırıştırma Ağı (PSPNet) geliştirilmiştir. Önerilen mimarinin genel bir çerçevesi, Şekil 1'de gösterilmiştir. ResNet, derin öğrenme modelinde ağı daha derin olmasını sağlayan bir tür konvolüsyonel sinir ağıdır. Bu çalışmada, ResNet omurga ağı, diş segmentasyonu için temel bir yapı olarak kullanılmış ve PSPNet ile birleştirilerek daha hassas sonuçlar elde edilmiştir. PSPNet, derin öğrenme tabanlı bir görüntü segmentasyon yöntemidir ve genellikle karmaşık sahnelerde yüksek doğruluk sağlamak için tercih edilir. Bu çalışmada, PSPNet'in diş segmentasyonu için uyarlanmış bir versiyonu kullanılmıştır. Önerilen mimari, PSPNet'in çok katmanlı ölçekli özellik haritaları oluşturma yeteneği sayesinde, dişlerin çeşitli boyutları ve şekilleriyle başa çıkabilme yeteneğini artırmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma, gömülü dişlerin hassas bir şekilde tanımlanması için etkili bir derin öğrenme tabanlı yöntem olan PSPNet'in kullanımını önermektedir. Önerilen mimari, diş segmentasyonu alanında gelecekteki araştırmalara ve uygulamalara ilham verecek önemli bir adımdır.



Şekil 1. Önerilen ResNet tabanlı PSPNet mimarisi

## 2.1. PSPNet (Piramit Sahne Ayrıştırma Ağı)

PSPNet, ilk olarak Zhao ve ark. tarafından önerilmiştir [14]. PSPNet temel olarak, yerel özellikleri bir araya getirerek piksel düzeyinde sahne ayrıştırma için yeterli bağlamsal bilgiyi sağlamaya dayanmaktadır. PSPNet, piramit pooling modülü aracılığıyla global bağlam bilgisini içselleştiren ve sahne ayrıştırmaya odaklanan bir semantik segmentasyon modelidir. Model, global bağlam bilgisini etkili bir şekilde kullanabilmesi için piramit analiz modülünü içerir [15]. Matematiksel olarak ifade edildiğinde,  $Y_i$  çıkış,  $X_i$  giriş ve  $\theta$  ise model parametrelerini temsil etmek üzere PSPNet şu formülle ifade edilebilmektedir:

$$Y_i = PSP(X_i; \theta) \quad (1)$$

Pyramid pooling, farklı bölgelerdeki bağlam bilgisini birleştirerek ayrıntılı segmentasyon görevlerinde modelin performansını artırır. Bu modül, ResNet ile entegre edildiğinde, ResNet'in özellik haritalarını piramit pooling ile zenginleştirir. PSPNet Piramit Havuzlama Modülleri sayesinde çok ölçekli özellikleri bir araya getirebilmektedir. Bu modüller, ağırlıklı farklı ölçeklerde bağlamsal bilgileri yakalamasına olanak sağlayarak, özellikle değişen nesne boyutlarına sahip senaryolarda segmentasyon doğruluğunu arttırmaktadır. Ayrıntıları daha da iyileştirmek için PSPNet'te genişletilmiş evrişimli katmanlar kullanılmaktadır. Bu katmanlar, hassas dış sınırlarının belirlenmesi için çok önemli olan alt örnekleme işlemi sırasında bilgilerin korunmasına yardımcı olmaktadır [14,15].

## 2.2. Omurga ağı: ResNet

ResNet, derin ağlarda karşılaşılan kayıp fonksiyonlarını azaltmak ve eğitim sırasında oluşan gradient kaybını önlemek için residual blokları içeren bir omurga ağıdır. Bu residual bloklar, önceki katmanların çıktılarını doğrudan geçiren bağlantılar içerir, bu da ağı daha derin olmasına izin verir. ResNet'teki atlama bağlantıları, bilgilerin düzgün akışını kolaylaştırarak bağlamsal ayrıntıların doğru şekilde yakalanmasına yardımcı olmaktadır [16].  $Y$  çıkış,  $X$  giriş ve  $W_i$  ise residual blok parametreleri olmak üzere ResNet şu şekilde ifade edilebilmektedir:

$$Y = F(X, \{W_i\}) + X \quad (2)$$

Önceden var olan bilgilerden yararlanmak için, ResNet omurgasının büyük veri kümeleri üzerinde eğitilmiş ağırlıklarla (ImageNet) başlatılması ile transfer öğrenimi kullanılır. Bu durum, eğitim sürecinde modelin daha hızlı yakınsamasına olanak tanımaktadır [17]. Segmentasyon aşamasında, ResNet'in farklı versiyonları (ResNet18, ResNet34, ResNet50, ResNet101 ve ResNet152) omurga ağı olarak kullanılmıştır. ResNet'in derin yapısı, hiyerarşik özelliklerin çıkarılmasını sağlayarak ağırlıklı dış segmentasyonuyla ilgili karmaşık modelleri öğrenmesine olanak sağlamaktadır. Bu özellik ile gömülü dış tespiti gibi dental görüntüleme uygulamalarında daha hassas sonuçlar elde edilerek ResNet omurgasının detaylı görüntü bilgisini daha etkin bir şekilde öğrenmesine ve analiz etmesine olanak tanımaktadır. Bu nedenle, ResNet'in transfer öğrenimi ve derin yapısal özellikleri, dental görüntüleme alanında çeşitli uygulamalarda kullanılabilecek güçlü bir araç haline gelmektedir.

### 3. Deneysel Sonuçlar

#### 3.1. Değerlendirme metrikleri

Performans ölçümleri, özellikle yapay zekâ ve görüntü işleme alanlarında, derin öğrenme modellerinin başarısını değerlendirmek için segmentasyon sorunlarına odaklanır. Bu ölçümler, modelin nesne sınırlarını doğru bir şekilde belirleme, bölümlendirme görevlerinde karmaşık ayrıntıları yakalama ve bölümlere ayrılmış bölgelerdeki performansını değerlendirmek için kullanılır [18]. Bu çalışmada önerilen modelin performansının hesaplanması ve karşılaştırılması için IoU Skor (Intersection Over Union), Dice Katsayısı (Dice Coefficient), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall) ve F1 Skor gibi performans metrikleri kullanılmıştır. Bu metrikler, Denklem 3-7'de verilmiştir.

$$\text{IoU Skoru} = \frac{DP}{DP + YP + YN} \quad (3)$$

$$\text{Dice Katsayısı} = \frac{2 * DP}{2 * DP + YP + YN} \quad (4)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (5)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (6)$$

$$\text{F1 Skor} = 2 * \frac{\text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (7)$$

Denklem 3-7'de verilen DP, DN, YP ve YN terimleri sırasıyla, doğru pozitif (true positive), doğru negatif (true negative), yanlış pozitif (false positive) ve yanlış negatif (false negative) olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda IoU Skor dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu metrik, sınıflar veya örnekler geneline tahmin edilen ve temel doğruluk maskelerinin kesişimi ve birleşimi arasındaki ortalama oranı hesaplar. Tahmin edilen ve gerçek bölgeler arasındaki örtüşmeyi ölçer [18,19].

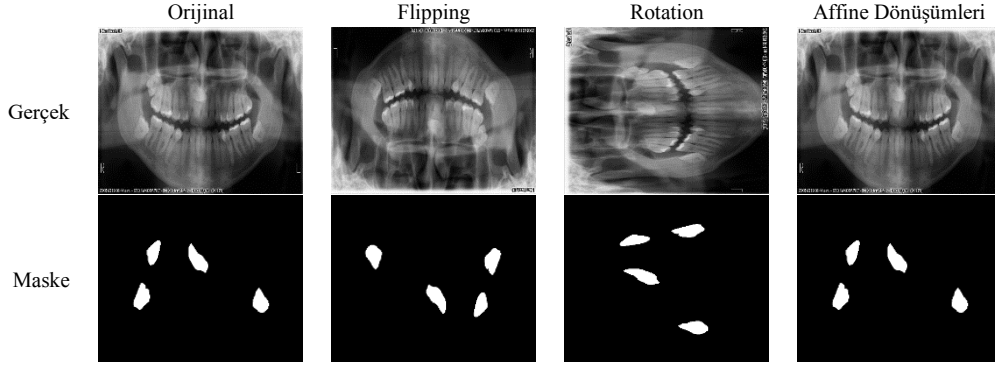
#### 3.2. Veri kümesi

Bu çalışma, iki farklı panoramik dış görüntüsü veri kümesini kullanmaktadır. Her iki veri kümesinin kullanımıyla ilgili detaylı bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur. Yüksek çözünürlüğe ve gömülü dışlara sahip görüntüler titizlikle seçilmiş ve birleştirilerek çalışmanın temel veri kümesi oluşturulmuştur. İlk veri kümesi, 598 panoramik görüntüden oluşmaktadır ve bu setten 53 görüntü seçilmiştir [20]. İkinci veri kümesi ise literatürde yaygın olarak kullanılan 116 panoramik görüntüye sahiptir ve bu setten 50 görüntü seçilmiştir [21]. Toplamda 103 adet yüksek çözünürlüklü görüntüden oluşan veri kümesi, uzman bir dış hekim tarafından dikkatlice etiketlenmiştir. Bu süreç, görüntülerin analizini ve sonuçların güvenilirliğini sağlamıştır.

**Tablo 1.** Kullanılan veri kümeleri

Kaynak	Veri Sayısı	Veri Türü	Kullanılan Veri Sayısı
[20]	598 adet	2041x1024, jpg	53 adet
[21]	116 adet	3100x1300, png	50 adet

Derin öğrenme, sinir ağlarını kullanarak verilerden karmaşık kalıpları öğrenmeye odaklanan makine öğreniminin bir alt dalıdır. Model performansını etkileyen önemli faktörlerden biri, eğitim verilerinin miktarı ve çeşitliliğidir. Veri artırma, mevcut verilere çeşitli dönüşümler uygulayarak yeni eğitim örnekleri oluşturur ve modelin sağlamlığı ile genelleme yeteneğini artırır. Özellikle sınırlı sayıda etiketlenmiş veri örneğiyle çalışıldığında, veri artırma modelin öğrenme performansını artırır ve aşırı uyum riskini azaltır. Bu çalışmada, eğitim veri setini genişletmek için çevirme (flipping), döndürme (rotation) ve affine dönüşümler gibi veri artırma teknikleri kullanılmıştır. Bu tekniklere ilişkin örnek görüntüler Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Veri artırma tekniklerinin örnek gösterimleri

### 3.3. Sayısal ve görsel sonuçlar

Bu çalışmada, gömülü diş tespiti için ResNet tabanlı PSPNet mimarisi geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, Python programlama dili kullanılarak Google Colab platformunda gerçekleştirilmiştir. Önerilen modelin eğitim parametreleri manuel olarak belirlenmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. PSPNet mimarisine ait parametreler

Parametre	Değer
Epoch Sayısı	150
Batch-Size	4
Optimizasyon	ADAM
Piramit Seviyesi	4
Aktivasyon	PReLU

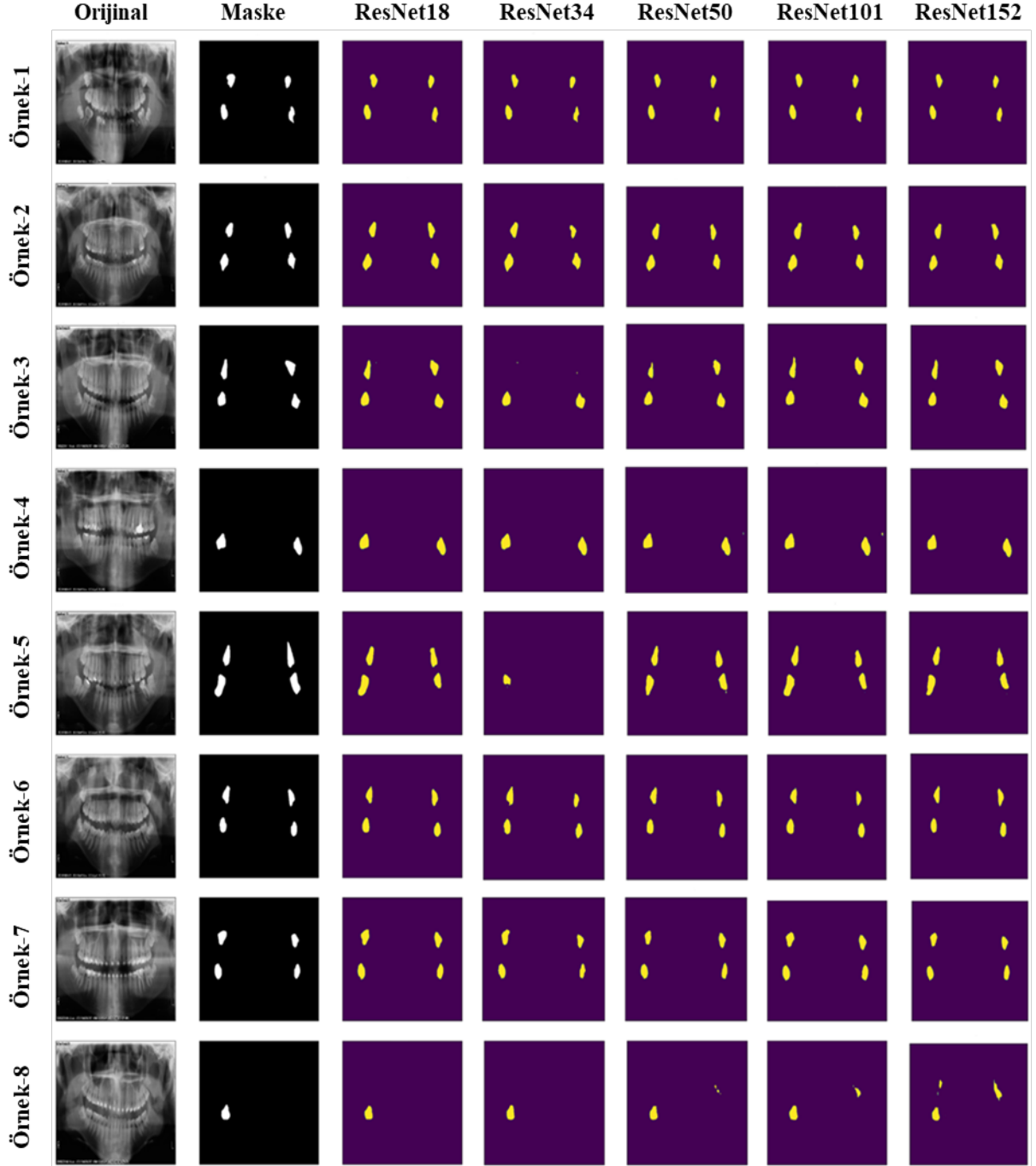
Tüm deneysel çalışmalarda, Tablo 2’de verilen derin parametreler kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmalarda, eğitim, doğrulama ve test setleri yalnızca bir kez gerçekleştirmek üzere sırasıyla %80, %10 ve %10 olarak rastgele bölünmüştür. Tüm uygulamalar için aynı test ve eğitim veri seti kullanılarak, gelişigüzel bölünmüş verilerin performans üzerindeki etkileri en aza indirilmiştir. Bu kapsamda, omurga ağı olarak kullanılan ResNet versiyonlara dayalı PSPNet modellerinden elde edilen performans sonuçları Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. PSPNet mimarisine ait başarımlar sonuçları

Model	F1 Skor	Kesinlik	Duyarlılık	Dice Katsayısı	IoU Skor
PSPNet+ResNet18	0.92090	0.93882	0.90392	0.96896	0.85340
PSPNet+ResNet34	0.87608	0.92868	0.83094	0.90177	0.78002
PSPNet+ResNet50	0.90391	0.95904	0.85483	0.89078	0.82469
PSPNet+ResNet101	0.90032	0.93273	0.87041	0.88464	0.81926
PSPNet+ResNet152	0.89334	0.92651	0.86258	0.88676	0.80791

Tablo 3’teki sonuçlara göre, ResNet ağlarının farklı versiyonlarından en yüksek performansı, %92.09 F1 skor, %93.88 kesinlik, %90.39 duyarlılık, %85.34 IoU Skor ve %96.89 Dice katsayısı ile ResNet18 modelinin gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, ResNet50, ResNet101 ve ResNet152 modelleri yaklaşık olarak %80-82 ortalama IoU Skoru üretirken, ResNet34 modeli %78 ortalama IoU Skoru ile en düşük performansı sergilemiştir.

Tablo 3'te sunulan sayısal sonuçlara ek olarak, Şekil 3'te yer alan görsel sonuçlar bulunmaktadır. Görsellerin ilk sütununda orijinal görüntüler yer alırken, ikinci sütunda ise maskeler bulunmaktadır. Sonraki sütunlarda ise her bir omurga ağının uygulandığı modellerin segmentasyon sonuçları görüntülenmektedir.



Şekil 3. Önerilen mimarinin görsel sonuçları

Şekil 3'teki görsel sonuçlara göre, genellikle ResNet modelleri gömülü dişlerin konumunu doğru bir şekilde tespit etmiştir. Ancak, bazı örneklerde (örnek 3 ve 5), ResNet34 modeli eksik gömülü dişleri tespit etmede başarısız olmuştur. Bu, modelin belirli koşullarda daha düşük doğruluk oranlarına sahip olabileceğini göstermektedir. Ayrıca, ResNet50, ResNet101 ve ResNet152 modelleri örnek 8'de gömülü olmayan bir diş yanlışlıkla gömülü olarak tespit etmiştir. Bu bulgular, ResNet modellerinin performansının değerlendirilmesi sırasında dikkate



alınması gereken önemli hususlardır. Sonuç olarak, ResNet18 modelinin diğer tüm modellere göre daha iyi görsel sonuçlar sunduğu açıkça görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Derin öğrenme tekniklerinin diş segmentasyonunda başarılı uygulanması, ağız sağlığı alanında önemli bir ilerleme sağlamaktadır. Bu teknikler, diş hekimlerine teşhis ve tedavi süreçlerinde önemli bir destek sunarak, hastaların tedavi deneyimini iyileştirmekte ve ağız sağlığına olumlu katkılar sağlamaktadır. Bu çalışmanın sonuçları, derin öğrenme tekniklerinin diş segmentasyonunda etkili bir şekilde kullanılabildiğini ve doğru teşhis ile tedavi yöntemlerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Derin öğrenme algoritmalarının kullanımı, diş hekimlerinin iş yükünü azaltmakta ve ayrıca zaman tasarrufu sağlamaktadır. Bu tekniklerin kullanımıyla birlikte, diş hekimleri hastaların teşhis ve tedavilerini daha hassas bir şekilde gerçekleştirebilirken, aynı zamanda diş sağlığı sorunlarının erken teşhisine olanak tanımaktadır. Bu durum, tedavi süreçlerinin iyileştirilmesinin yanı sıra hastaların ağız sağlığı ile ilgili yaşam kalitesini artırıcı bir etki yaratmaktadır. Derin öğrenme tekniklerinin diş segmentasyonunda kullanımı, dental alandaki uygulamaları daha etkili hale getirerek, genel olarak ağız sağlığının iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, derin öğrenme tekniklerinin diş segmentasyonunda kullanımının daha geniş bir yelpazede incelenmesi ve farklı diş yapılarıyla daha kapsamlı test edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, bu tekniklerin klinik uygulamalarda gerçek zamanlı olarak nasıl entegre edilebileceği ve klinik sonuçlara nasıl etki edebileceği üzerine daha fazla araştırma gerçekleştirilecektir.

#### Kaynaklar

- [1] Özkesici MY, Yılmaz S. Oral ve maksillofasiyal radyolojide yapay zekâ. Sağlık Bilimleri Dergisi. 2021; 30(3): 346-351.
- [2] Martins MV, Baptista L, Luís H, Assunção V, Araújo MR, Realinho V. Machine learning in x-ray diagnosis for oral health. A Review of Recent Progress, Computation, 2023; 11(6): 115.
- [3] Chen YW, Stanley K, Att W. Artificial intelligence in dentistry: current applications and future perspectives. Quintessence Int, 2020; 51(3): 248-257.
- [4] Durmuş M, Ergen B, Çelebi A, Türkoğlu M. Panoramik diş görüntülerinde derin evrimsel sinir ağına dayalı gömülü diş tespiti ve segmentasyonu. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2023; 38(3): 713-724.
- [5] Kweon HHI, Lee JH, Youk TM, Lee BA, Kim YT. Panoramic radiography can be an effective diagnostic tool adjunctive to oral examinations in the national health checkup program. Journal of periodontal & implant science, 2018. 48(5): 317-325.
- [6] Schneider L, Arsiwala-Scheppach L, Krois J, Meyer-Lückel H, Bressen KK, Niehues SM, Schwendicke F. Benchmarking deep learning models for tooth structure segmentation. Journal of dental research, 2022; 101(11): 1343-1349.
- [7] Zhu J, Chen Z, Zhao J, Yu Y, Li X, Shi K, Zhang F, Yu F, Shi K, Sun Z, Lin N, Zheng, Y. Artificial intelligence in the diagnosis of dental diseases on panoramic radiographs: a preliminary study. BMC Oral Health, 2023; 23(1): 358.
- [8] Lee S, Oh SI, Jo J, Kang S, Shin Y, Park JW. Deep learning for early dental caries detection in bitewing radiographs. Scientific reports, 2021; 11(1): 16807.
- [9] Zadrożny Ł, Regulski P, Brus-Sawczuk K, Czajkowska M, Parkanyi L, Ganz S, Mijiritsky E. Artificial intelligence application in assessment of panoramic radiographs. Diagnostics, 2022; 12(1): 224.
- [10] Musri N, Christie B, Ichwan SJA, Cahyanto A. Deep learning convolutional neural network algorithms for the early detection and diagnosis of dental caries on periapical radiographs: A systematic review. Imaging science in dentistry, 2021; 51(3): 237.
- [11] Chen H, Zhang K, Lyu P, Li H, Zhang L, Wu J, Lee CH. A deep learning approach to automatic teeth detection and numbering based on object detection in dental periapical films. Scientific reports, 2019; 9(1): 3840.
- [12] Kuwada C, Arijji Y, Fukuda M, Kise Y, Fujita H, Katsumata A, Arijji E. Deep learning systems for detecting and classifying the presence of impacted supernumerary teeth in the maxillary incisor region on panoramic radiographs. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology, 2020; 130(4): 464-469.
- [13] Imak A, Çelebi A, Polat O, Türkoğlu M, Şengür A. ResMIBCU-Net: an encoder-decoder network with residual blocks, modified inverted residual block, and bi-directional ConvLSTM for impacted tooth segmentation in panoramic X-ray images. Oral Radiology, 2023; 1-15.
- [14] Zhao H, Shi J, Qi X, Wang X, Jia J. Pyramid scene parsing network. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2017; 2881-2890.
- [15] Yang C, Guo H. A method of image semantic segmentation based on pspnet. Mathematical Problems in Engineering, 2022.
- [16] Hossain MB, Iqbal SHS, Islam MM, Akhtar MN, Sarker, IH. Transfer learning with fine-tuned deep CNN ResNet50 model for classifying COVID-19 from chest X-ray images. Informatics in Medicine Unlocked, 2022; 30: 100916.

- [17] He K, Zhang X, Ren S, Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016; 770-778.
- [18] Haque IRI, Neubert J. Deep learning approaches to biomedical image segmentation. *Informatics in Medicine Unlocked*, 2020; 18: 100297.
- [19] Ahmed I, Ahmad M, Khan FA, Asif M. Comparison of deep-learning-based segmentation models: Using top view person images. *IEEE Access*, 2020; 8: 136361-136373.
- [20] Román JCM, Fretes VR, Adorno CG, Silva RG, Noguera JLV, Legal-Ayala H, Román JDM, Torres RDE, Facon J. Panoramic dental radiography image enhancement using multiscale mathematical morphology. *Sensors*, 2021; 21(9): 3110.
- [21] Abdi AH, Kasaei S, Mehdizadeh M. Automatic segmentation of mandible in panoramic x-ray. *Journal of Medical Imaging*, 2015; 2(4): 044003-044003.

## A Statistical Assessment of Drinking Water Quality: A Case Study of Doburca Treatment Plant, Bursa

Damla YILMAZ<sup>1\*</sup>, Egemen ARAS<sup>2</sup>, Babak VAHEDDOOST<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Civil Engineering Department, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Bursa Technical University, Bursa, Turkey

\*<sup>1</sup> damla.yilmaz@btu.edu.tr, <sup>2</sup> egemen.aras@btu.edu.tr, <sup>3</sup> babak.vaheddoost@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 19/06/2023;

Kabul/Accepted: 09/11/2023)

**Abstract:** In order to provide and maintain urban health standards, assessing the quality of drinking water is an essential step. As a result of different pollutant factors (climate, heavy metals, vegetation, human activities, etc.), it is inevitable that the quality of water resources decreases day by day. In this study, the data of 21 water samples taken between January 2021 and June 2021 from the water drinking facility providing drinking water to Bursa were examined. Firstly, the strength and direction of the relationship between 10 different parameters (electrical conductivity (EC), copper (Cu), nickel (Ni), nitrate ( $NO_3^-$ ), arsenic (As), iron (Fe), total dissolved substances (TDS), total alkalinity (TA), total hardness (TH) and dissolved oxygen (DO)) were evaluated with the help of relation analysis, water quality index, and polynomial curve fitting. The relationship of the parameters that do not have a linear correlation was also interpreted and finally, as a result of using the weighted arithmetic water quality index (WAWQI), it was determined that the potability of the water quality in the allocated water reservoir was at the 'excellent' level and fulfills the requirements.

**Keywords:** Treatment plants, Correlation analysis, Surface water, Water quality index

### İçme Suyu Kalitesinin İstatistiksel Olarak Değerlendirmesi: Bursa Doburca Arıtma Tesisinin Örneği

**Öz:** Kentsel sağlık standartlarını sağlamak ve bu standartları sürdürebilmek için içme sularının kalitesini değerlendirmek öncelikli adımdır. Farklı kirlenme faktörlerinin (iklim, ağır metaller, bitki örtüsü, beşeri faaliyetler vs.) su kaynaklarını tehdit etmesi neticesinde günden güne kalitenin düşmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu bağlamda, ülkemizin dördüncü büyük şehri olan Bursa'ya içme suyu sağlayan tesisin Ocak 2021 ile Haziran 2021 tarihleri arasında alınan 21 su numunesine ilişkin verileri, çeşitli ilişki analizi yöntemiyle incelenmiştir. Öncelikle, değerlendirilmek üzere olan 10 farklı (elektrik iletkenliği (EC), bakır (Cu), nikel (Ni), nitrat ( $NO_3^-$ ), arsenik (As), demir (Fe), toplam çözünmüş maddeler (TDS), toplam alkalinite (TA), toplam sertlik (TH) ve çözünmüş oksijen (DO)) parametre arasındaki ilişkinin gücü ve yönü ilişki analizi, su kalite indeksi ve polinom eğri uydurma yöntemine tabi tutularak irdelenmiştir. Doğrusal korelasyon ilişkisi bulunmayan parametrelerin ilişkisi yorumlanmış ve son olarak ağırlıklı aritmetik su kalitesi indeksi (WAWQI) neticesinde tahsis edilen su deposundaki su kalitesinin içilebilirliğinin 'mükemmel' seviyede olduğu ve gereklilikleri karşıladığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Arıtma Tesisleri, Korelasyon analizi, Yüzeysel su, Su kalitesi indeksi

#### 1. Introduction

Water is an indispensable building block of human life. It is a source for life that covers three quarter of the world's surface, and constitute 70% of the body mass. However, only one percent of the total (1.4 billion km<sup>3</sup>) water reserves on Earth is fresh and suitable for direct use while the drinking water constitutes only one third of the fresh water resources [1]. Although a relatively small portion of available water is used for drinking purposes, finding a reliable and suitable source of so-called 'clean water' fitting for the water quality codes suggested by World Health Organization (WHO) is a hard task. By far, access to the clean water is recognized as a fundamental right for anyone [2]. But, about 780 million people around the world do not have access to sufficient clean water. In this respect, many people have low life standards, and get sick very often due to the consumption of water that does not meet the expectations.

The water pollution control and regulation is one of the most important policy agendas [3]. Yet, potable waters are adversely affected by pollutants from domestic, industrial, and agricultural activities. More precisely, the discharge

\* Sorumlu yazar: [damla.yilmaz@btu.edu.tr](mailto:damla.yilmaz@btu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1\*</sup> 0000-0001-9572-0163, <sup>2</sup> 0000-0002-7553-9313, <sup>3</sup> 0000-0002-4767-6660

of industrial and domestic wastes into the surface waters, the use of pesticides, and pollution caused by the sea vessels are the main factors that reduce water quality [4,5]. In this respect, the water pollutants can be categorized as organic, inorganic, and microbiologic type [6]. However, the inorganic pollutants have the largest share in contamination of the drinking water. These pollutants are usually formed by the discharge of industrial processes and waters into the waterways that are mainly composed of metals, salts, mineral acids and minerals [7]. These substances, are very likely to mix into the drinking water, and not only increase the acidity and salinity level of the water but also increase the water toxicity. As a result, this can cause serious damage to the human and animal health and even be fatal due to the presence of heavy metals with high concentration, toxicity, and carcinogenic effects in humans [8]. Studies show that the accumulation of *Pb*, *Zn*, *Hg*, *Ni*, *As* and *Cu* in drinking water has increased in the last 50 years and therefore threatens human health [9].

By far, a number of tools and codes have been developed to control and evaluate the water pollutants. These procedures include various analysis on different parameters, e.g. heavy metals, pH, turbidity, and total dissolved substances [3, 10]. However, if the concentration of the parameters does not cross the predefined limits (e.g. those suggested by World Health Organization, WHO), the compliance of the water with the drinking water standards is approved for consumption. In this respect, there are various water quality indices that evaluate the drinking water quality, enabling researchers to agree on important principals. These indexes combine the data obtained from more than one water quality parameter in a mathematical equation that ranks the nature of water bodies with numbers and produces a drinking water quality index [11]. Water quality indices (WQI) were first developed by Horton in 1965 to evaluate water quality with the help of 10 commonly used water quality parameters. The method was later updated by different experts with the help of different water quality parameters. In a WQI, the parameters to be used are initially selected and their correspondence functionality are determined based on the framework of the water quality code. Afterwards, the WQI is calculated based on predefined equation(s) later to be evaluated for making decisions [12]. As different results have been reported for by national and international organizations, many WQIs has been developed around the world to alternate each other. Likewise, Weighted Arithmetic Water Quality Index (WAWQI), the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), the Canadian Council of Environment Ministers' Water Quality Index (CCME WQI), and the Oregon Water Quality Index (OWQI) are the most well-known indices. WAWQI, is one of these indexes, that provides the opportunity to obtain results with fewer parameters, especially compared to the other water quality indexes [13]. In the study of Anyanwu et al. [14] used the WAWQI, to evaluate the drinking water quality of the Ikru river in Nigeria. For this, 13 parameters including temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, total dissolved solids, chemical oxygen demand, nitrate, alkalinity, phosphate, sulphate, chloride, and calcium were evaluated among the physico-chemical parameters of the river. It was concluded that the water samples from one of the stations is not suitable for drinking. In the study of Ochuko et al. [11] used NSFWQI to evaluate the water samples taken from four different settlements between January 2011 and December 2011. It is reported that the NSFWQI of the data taken from the urban settlement area has a much lower NSFWQI values than the data in the rural settlement area. In conclusion, the NSFWQI showed that the rural communities of Obikwele and Osemele recorded a higher NSFWQI of 58.08 and 54.92, respectively, compared to 42.80 and 46.30 recorded in the urban communities of Kwale and Ashaka. In the study of Al-Ani [15], water samples were taken from seven different stations to evaluate the water quality in the Al-Hilla River located at the south of Baghdad with the help of the WAWQI. In the study, eight different parameters including turbidity, TDS, dissolved oxygen, hydrogen ion concentration, EC, chlorides, alkalinity and biological oxygen demand were examined and the calculated WAWQI rates, indicated that the river water is not suitable for drinking.

By far, correlation analysis can be considered as one of the most popular tools in evaluation of the link between water quality parameters. For instance, in the study of Tong et al. [16] examined the relationship between drinking water parameters in the Lhasa region in China with help of the correlations coefficient. Conducted analysis showed that, the correlation between the pairs of *Se-Cd*; *Se-Pb*; *Pb-Cd*; *Ni-Cu*; *Co-Cu*; and *Ni-Co* is respectively as 0.6147 ( $p < 0.01$ ), 0.6713 ( $p < 0.01$ ), 0.5680 ( $p < 0.01$ ), 0.6757 ( $p < 0.01$ ), 0.5322 ( $p < 0.01$ ), and 0.9239 ( $p < 0.01$ ). It is concluded that the concentration of the *Se*, *Cd*, and *Pb* in the samples may be originated from the same source; while the concentration of *Ni*, *Co* and *Cu* in the samples may be of the same source. In the study of Heydari et al. [17], chemical and statistical correlation and regression analyses were performed on drinking water samples from five sites (21 sampling wells) located in hot and dry climate at Kashan city located in central Iran. Twelve parameters including pH, EC, TDS, total hardness (TH), calcium ( $Ca^{2+}$ ), magnesium ( $Mg^{2+}$ ), sulphate ( $SO_4^{2-}$ ), chloride ( $Cl^-$ ), nitrate ( $NO_3^-$ ), sodium ( $Na^+$ ), potassium ( $K^+$ ) and fluoride ( $F^-$ ) were evaluated in the study during October 2006 to May 2007 (25-30 °C). The obtained results indicated to the dominance of *NaCl* (WHO), while there existed strong positive correlations between TDS - EC ( $r:0.99$ ), and  $Ca^{+2}$  - TH ( $r:0.95$ ). It was also

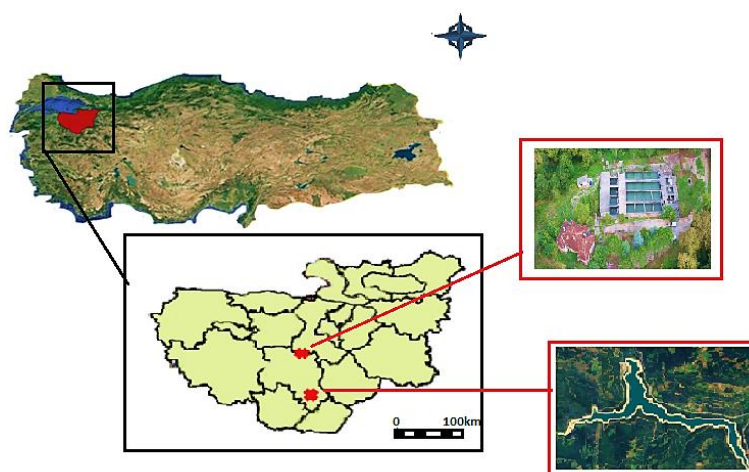
concluded that the systematic calculations of correlation coefficients between water parameters and regression analysis provide a useful tool for rapid monitoring of water quality.

In this study, the quality of drinking water provided to the people of Bursa by the Doburca Drinking Water Treatment Plant was analysed in terms of 10 parameters including electrical conductivity (EC), copper (Cu), nickel (Ni), nitrate ( $NO_3^-$ ), arsenic (As), iron (Fe), total dissolved substances (TDS), total alkalinity (TA), total hardness (TH) and dissolved oxygen (DO) were evaluated as a result of weekly water samples taken between January 2021 and June 2021. Pearson's correlation coefficient was used to represent the relationship between pairs of parameters, and the pairs with a very strong relationship and low linear correlation were interpreted in detail. Then, weighted arithmetic water quality index (WAWQI) was used to evaluate the quality of the water samples and the potability level of the samples that were not properly addressed previously.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Study area

Bursa is a city that owns 115 km. coastline along with the Marmara Sea, permeant lakes, and vast wetlands. It is known with surplus in water resources, snow packs at summit of Mount Uludag, and vast forests. The urban water is mostly provided from three main sources while the largest share belongs to the surface water resources. In this respect, the surface water resources in the region includes streams, natural lakes, as well as dams' reservoirs. More specifically, the Nilufer Stream, which has the largest catchment area in Bursa (680 km<sup>2</sup>) is an important water resource (Figure 1) providing water for the city with help of the Doganci and Nilufer Dams [18]. The treatment processes of Doganci Dam at Doburca, was put into service in 1983 in order to meet the drinking water demand of the Bursa city, while the facility purifies an average of 270,000 m<sup>3</sup>/day and meets 80% of the city's drinking water needs [19]. In the facility; the processes of enriching the water with oxygen and improving its taste and odour by aeration, removing the turbidity caused by suspended solids in the water with the help of chemical methods and making the water microbiologically clean by disinfection are carried out. The samples taken from Doganci dam are located at 40°06'42.5 "N 28°57'45.8 "E. The location of the dam is shown in Figure 1.



**Figure 1.** Doganci dam and water treatment plant location

### 2.2. Data used

The data used in this study were officially obtained from Doburca drinking water treatment plant. The data provided were recorded a total of 21 times between 04 January 2021 and 01 June 2021 to be taken every week, and the initial measurements and determination of the parameters were carried out by the facility. The analyses were carried out in Bursa Doburca drinking water treatment plant laboratory. In Table 1, the values obtained from the samples are given together with the standards provided by WHO and TSE 266. In the analyses, the new fourth generation UV-VIS spectrophotometer Hach Lange DR 6000 with RFID technology, designed and manufactured in Germany, was used. This device offers high-speed wavelength scanning across the UV and visible spectrum and comes with over 250 pre-programmed methods, including the most common testing methods used today.

**Table 1.** Suitability of the present study with different drinking water standards

PARAMETERS	METHOD	UNIT	TSE 266	WHO	Maximum values	Minimum values	Average values
Conductivity	SM 2510 B.	μS/cm	2500	2500	362.10	417	390.19
Nitrate	EPA300.1	mg/L	50	50	0.48	2.15	1.59
Iron	EPA 6020A	μg/L	0.20	0.30	0.5×10 <sup>-2</sup>	2.1×10 <sup>-2</sup>	1.01×10 <sup>-2</sup>
Arsenic	EPA 200.8	μg/L	0.01	0.01	0.1×10 <sup>-3</sup>	3.41×10 <sup>-3</sup>	1.9×10 <sup>-3</sup>
Copper	EPA 200.8	μg/L	2	2	0.1×10 <sup>-3</sup>	0.99×10 <sup>-3</sup>	0.56×10 <sup>-3</sup>
Nickel	EPA 200.8	μg/L	0.02	0.02	0.1×10 <sup>-3</sup>	2.69×10 <sup>-3</sup>	1.71×10 <sup>-3</sup>
Total Alkalinity	SM 2320 B.	mg/L	-	-	100	248	189.70
Dissolved Oxygen	SM 4500-OG	mg/L	-	-	9.10	10.69	10.18
Total Dissolved Substance	SM 2540 C.	mg/L	-	-	178	201	250.15
Total Hardness	SM 2340 C.	mg/L	-	500	170	196.60	187.80

### 2.3. Correlation analysis

One of the well-known methods for data and water quality evaluation is the correlation analysis. Correlation analysis examines the joint relationship between the dependent and the independent variables of any kind. In this study, the relationship between the water quality parameters was evaluated with the help of Pearson correlation coefficients (r). The correlation coefficient is very effective in expressing the level of the linear relation between two or multiple parameters. However, high correlation does not imply causation or low correlation does not necessarily indicate the absence of relationship between variables. Yet, the correlation coefficient if considered to be significant, is a sign for concordance between variables and can be approved or rejected by further analysis. In this respect, Table 2 provides the information regarding the examination of correlation coefficient and how it can be evaluated in the posterior analysis.

**Table 2.** Bench marks of correlation coefficient for posterior analysis [20]

Correlation coefficient range	Level
(-0.25) ~ 0.00 and 0.00~0.25	Very weak
(-0.49) ~ (-0.26) and 0.26~0.49	Weak
(-0.69) ~ (-0.50) and 0.50~0.69	Moderate
(-0.89) ~ (-0.70) and 0.70~0.89	Strong
(-1.00) ~ (-0.90) and 0.90~1.00	Very strong

After conducting the correlation analysis, regression models can be developed in evaluation of the parameters depicting strong correlation coefficients, and estimation of the concentration of other components. The systematic study of the correlation coefficients of the parameters helps making effective predictions in assessing the water quality. In addition, it not only supports measuring the relative concentration of pollutants in water and providing necessary clues for the implementation of water quality management programs, but the combined effect of strong correlations between different parameters makes serious contributions in the assessment of water quality [21].

### 2.4. Water quality index (WQI)

The WQI organizes large amounts of data and brings them together on a common denominator later to be separated into basic categories (excellent, good, poor, unsuitable). The WQI is an effective tool for comparing the water quality resources of different water bodies and provides a general idea of potential water-related hazards in a given area. The index is used as a very effective method in associating the trend of water quality data with water quality management [22,23]. Hence, the WAWQI can be calculated using the following equation [24].

$$WAWQI = \frac{\sum Q_n W_n}{\sum W_n} \quad (1)$$

while,  $Q_n$  is the sub-index for the water quality parameter; and  $W_n$  is the weight associated with the water quality parameter. The quality rating scale ( $Q_n$ ) for each parameter is then calculated using,

$$Q_n = 100 \left[ \frac{V_n - V_i}{V_s - V_i} \right] \quad (2)$$

where,  $V_n$  in this equation is the estimated concentration of the  $i$ th parameter in the analysed water and,  $V_i$  is the ideal value of this parameter in pure water.  $V_i = 0$  (excluding pH: 7.0 and DO: 14.6 mg/L).  $V_s$  is the recommended standard value of the  $i$ th parameter [13]. The unit weight ( $W_n$ ) for each water quality parameter can be calculated as,

$$W_n = \frac{K}{V_s} \quad (3)$$

where,  $K$  is the proportionality constant and calculated as,

$$K = \left[ \frac{1}{\sum \left( \frac{1}{V_s} \right)} \right] \quad (4)$$

Therefore, the degree of water quality according to the obtained value can be evaluated as given in Table 3.

**Table 3.** Water quality grading according to the WAWQI method [24]

WAWQI	Water Quality Status
0-25	Excellent
26-50	Good
76-100	Very Poor
Above 100	Unsuitable

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Evaluation of water quality standards

Minimum, maximum and average values of 21 water samples are given in the study (Table 1). These values were measured weekly between January 2021 and June 2021. The concentration of each parameter was determined by Hach Lange DR 6000 UV-VIS spectrophotometer and it was determined whether it was in the range of two different standards. In case of deviation of these parameters from the standard, each parameter was interpreted in detail in case of serious damage.

It is known that the Nitrate ion transforms into nitrite ion ( $NO_2^-$ ), especially for babies younger than one-year-old, and causes *Methemoglobinemia* (blue-baby) disease. In this respect, when the nitrate ion ( $NO_3^-$ ) concentration exceeds 50 mg/L, it becomes harmful for human being [25]. Considering this fact, the average value for the  $NO_3^-$  in 21 samples is 1.599 mg/L and therefore it is safe for consumption. *Fe*, also does not depict a negative effect on human health since its concentration is lower than 0.3 mg/L. However, one of the damages that may occur is the potential for bacterial growth in the water networks and a muddy sediment coating in the pipes [26]. *As* on the other hand, leaves serious toxic effects when its concentration is more than 0.01 mg/L in the water samples. In this respect, skin cancer, kidney diseases, skin diseases, vomiting and dizziness are some of these symptoms. Given in the Table 1, the *As* value as 0.0019 mg/L is below the standard limit. *Cu* in the natural water resources, can be found as the aftermath of rock erosion or industrial activities. Although the copper is a nutritionally necessary element, its deficiency can cause diseases such as *Anaemia* and nervous system deterioration, yet the high concentration of *Cu* intake cause digestive system disorders, liver, and kidney damage [26]. However, compared to the substances such as *Ni*, *As*, and *Zn* the toxicity rate is low, and its concentration rate is well below the boundary limit. The dissolved oxygen value of the water changes depending on the water temperature and the chemical, and the biological processes taking place in the water distribution network. Previous studies concluded that, if the dissolved oxygen rate is lower than 5 mg/L, it does not comply with the standards [14]. At low oxygen concentrations however, the aesthetic quality of the water (taste, odor, corrosion) is adversely affected due to the growth of undesirable anaerobic microorganisms. As can be seen from Table 1, the mean dissolved oxygen value in the current study is determined as 10.18 mg/L. Alkalinity has no known harm to the humans; however,

moderately alkaline waters (less than 350 mg/L) combined with hardness tends to inhibit corrosion of metal pipes. If the alkalinity value exceeds 500 mg/L, it may be associated with high pH and hardness values. Especially above these values, in the case of reduced heat transfer in hot water systems, the costs increase significantly. The actual desired value range for alkalinity is 75-400 mg/L [27]. Finally, the TDS measures the total amount of dissolved minerals in the water. Solids are likely to be Iron, Chlorides, and Sulphate or any kind of mineral found on Earth. Dissolved minerals can produce an unsuitable taste or appearance and cause scale deposits to form on the pipe walls. Values of less than 500 mg/L for TDS are quite appropriate. In this context, the value of 250.15 mg/L measured in the study proves that the parameter complies with the standards. Therefore, it is concluded that the average rates of 21 samples given in Table 1 generally fulfils the requirements for eligible drinking water.

### 3.2. Correlation analysis

Determining whether there is a relationship between the parameters and also the strength of this relationship is an important step in water quality assessments. During the treatment of the water entering the plant, the quality of the effluent is determined by considering the relationship between the parameters instead of evaluating them separately. The correlation coefficient, which shows the strength and direction of this relationship, can be applied for two or more variables. In this study, the binary relationship of ten parameters was analysed and interpreted in the context of correlation analysis. The correlation matrix of the variables is given in Figure 2. This graph was obtained using the 2023 R1 software Rstudio programme. In the light of Table 2, some of the relationships can be considered as strong or very strong. In particular, it was determined that there is a very strong positive correlation between the EC and TDS. The stronger the correlation the bigger the value provided in the chart. A total of 210 water samples, 21 from each parameter, were taken in the study. Since it was found that the random data conformed to the normal distribution when tested, it was accepted that all data conformed to the normal distribution. According to Figure 2, the most of the parameters have near normal distribution while the correspondence between the selected parameters cannot be confirmed with the help of scatter diagrams by ease.

Alternatively, the positive linear correlation between EC and TDS is supported by the Figure 3a that depicts high concordance between horizontal and vertical axis on the perfect fit line. Conductivity is a measure of the capacity of the liquid to transmit an electric charge, but this parameter depends on the ion concentration and ionic strength, while the measurement of the dissolved ion concentration is usually done with TDS. In freshwaters, the major ions associated with the TDS are chloride, sodium, and magnesium [28]. Researchers have done various studies to express the relationship between these two parameters mathematically and have expressed the correlation of the parameters using,

$$TDS (mg/L) = k \times EC (\mu S/cm) \quad (5)$$

where the  $k$  value increases with the increase of ions in the water and changes depending on the type of water (sea water, irrigation water, fresh water, etc.). Hence, the relationship between EC and TDS can be evaluated depending on the activity of certain dissolved ions and the ionic strength. We also examined the relationship between the EC and  $NO_3^-$ . The correlation coefficient between these parameters depicts a strong bound of 0.80 indicating that there is a strong positive correlation between electrical conductivity and the nitrate concentration (Figure 3b). In the study of Rehman et al. [29], it was determined that the  $NO_3^-$  and EC correlation coefficients of two tehsils were quite low ( $r$ : 0.235;  $r$ : -0.123), and one was very high ( $r$ : 0.950) according to the data obtained from three different tehsils. Similarly, in the study of Mudgal et al. [30] monitored the hydro-chemical properties of groundwater in Alwar. Therefore, in this study, the suitability of groundwater for drinking and irrigation purposes and the relationship between parameters were investigated.  $NO_3^-$  and EC correlation coefficient was calculated as 0.8 and it was observed that there was a moderate positive correlation compared to other studies.



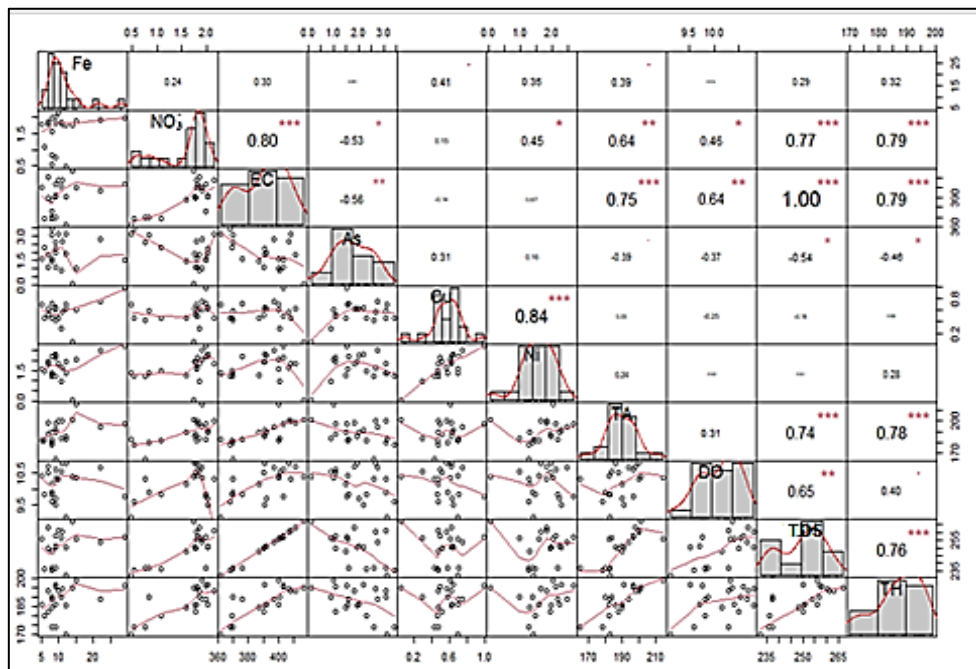


Figure 2. Correlation analysis of the parameters

The use of groundwater in studies may depict different from the coefficient in the current study. In addition, the geographical conditions of the regions and their impact on the available water resources can be examined to evaluate the difference. Afterwards, according to the obtained results there is a positive correlation of 0.842 between *Ni* and *Cu* (Figure 3c).

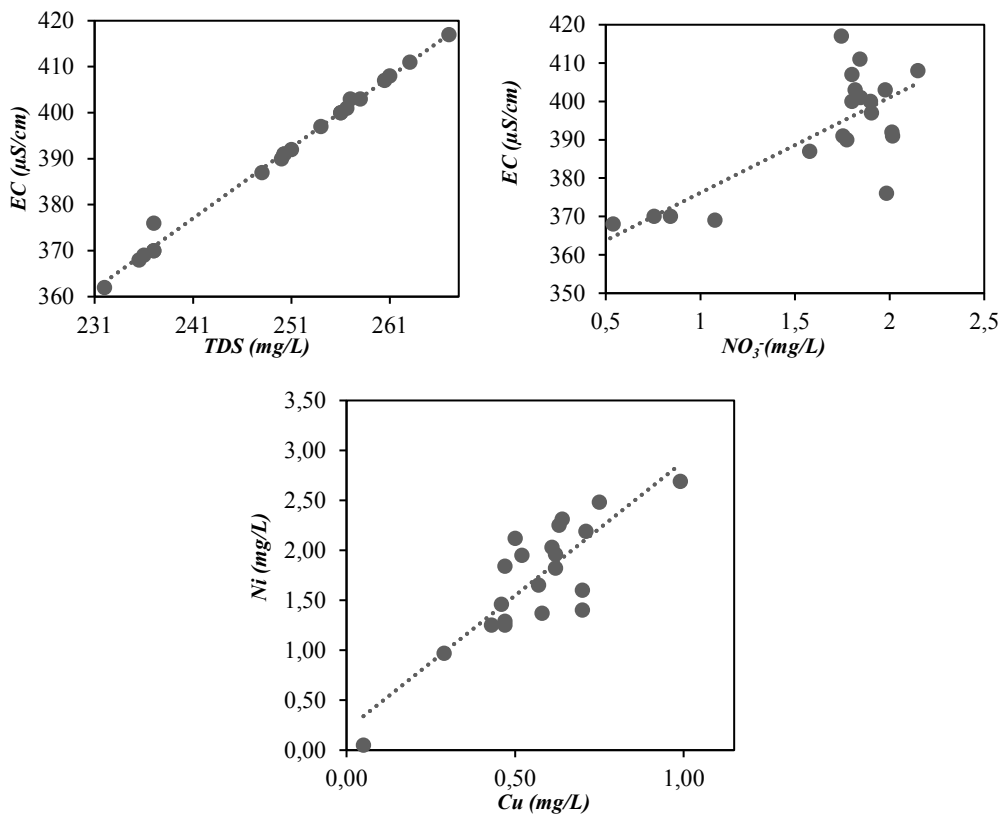


Figure 3. Correlation graph for a) EC and TDS b) EC and  $NO_3^-$  c) Ni and Cu

In many studies, it was aimed to determine the relationship between water quality parameters, and the relations including *Ni* and *Cu* were examined within the scope of the study. In the study of Tong et al. [16] as the value of the correlation coefficient between *Ni* and *Cu* was 0.6757, a positive moderate relationship could be associated with the allocated parameters. Since the water sources used in the study are of the surface water and household drinking water tabs, a close correlation coefficient relationship can be considered in our current study. On the other hand, in the study of Heydari et al. [17] it was determined that the correlation coefficient is about 0.254 and indicates that there is no relationship between these parameters. This is thought to be due to the difference between the selected time span of the present study and the study of Heydari et al. [17] who supplied samples from wells instead of surface water. For further comparison between all the allocated variables normalization is conducted that is given in Figure 4. Significant deviations were observed in *Fe*, *Cu* and *Ni* values on a monthly basis. According to Figure 4, the month in which these three parameters deviate together is April. In addition, the binary visual relation of the parameters whose correlation relations are given in Figure 2 can be deduced.

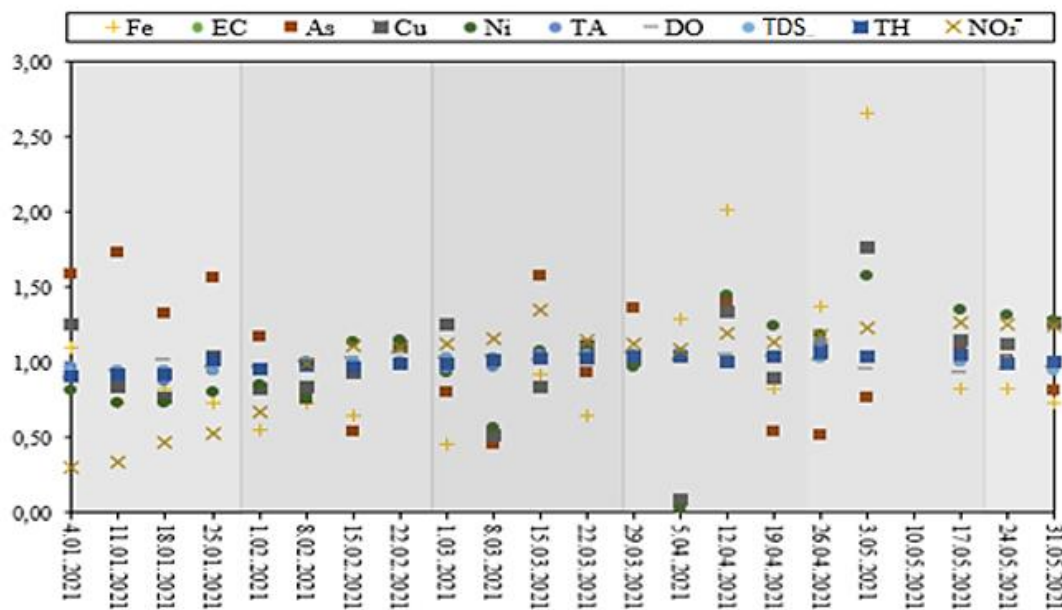


Figure 4. Weekly value comparison within the parameters

Since the value ranges and units of the parameters are different in Figure 4, standardisation was applied. In this way, a dimensionless comparison can be made. The deviation of the parameters together in certain months can be defined by correlation relations.

It is observed that the parameters that do not have a linear relationship, yet similar deviations occur at the same time. Therefore, the nonlinear relationship of these parameters, which do not have a linear relationship, was also examined and this situation was followed visually in Figure 5. A certain ratio of nonlinear relationships was found between the parameters that did not have a linear correlation ( $r < 0.5$ ). Hence the pairs with the highest  $R^2$  value among the parameters that do not have a linear relationship is shown Figure 5.

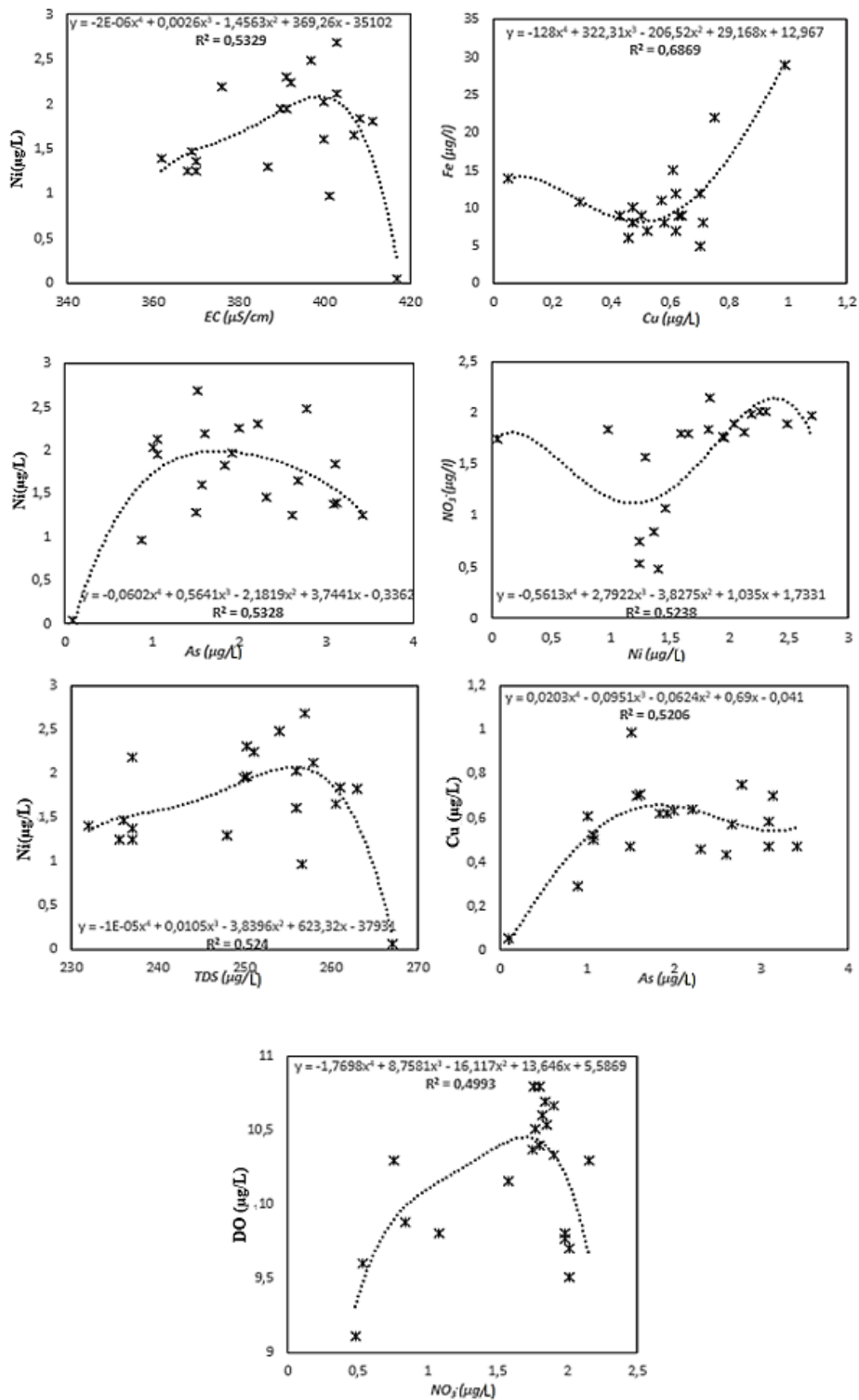


Figure 5. Nonlinear relations of parameters

### 3.3. Weighted arithmetic water quality index (WAWQI) analysis

World Health Organisation (WHO) standards are used in many drinking and potable water treatment plants. Testing the analyses with different standards is of great importance in terms of improving the quality of water [31].

In this context, unlike other studies, BIS standards were evaluated in WAWQI analyses in this study. While selecting the parameters to be used in the analysis, mostly heavy metals were preferred, as their high concentration cause serious harms. Therefore, in this study, the WQI method was preferred within the framework of BIS standards. In the study of García-Ávila et al. [32] compared the Council Water Quality Index (CCME WQI) with the Arithmetic Water Quality Index (WAWQI). As a result of the study, the standard values used in calculating the WAWQI value showed that more precise and accurate results were obtained. As a result of the limited number of parameters used, these two indices could be compared. Compared to WAWQI, the algorithm used to calculate the CCME WQI does not include any subscripts. However, the index is quite generic and requires careful selection of parameters and it was found that it does not take into account the weights between parameters. In this context, the index used in the study keeps the drinking water quality standard range in a more reliable range. According to Table 4, the mean values ( $V_n$ ) of nine parameters were taken and expressed mathematically within the framework of the standards. As a result, the WAWQI value was calculated as 15.50 and in the light of Table 3, the suitability of drinking water was determined to be at the “excellent” level. In the study of Aydin et al. [33] determined the water quality of seven major streams in Giresun province. Complex data were evaluated by WQI and several important multivariate techniques. According to the WQI results, all streams were characterised with a "good water" quality rating and are suitable for drinking water. Similarly, PCA/FA, HCA, correlation matrix, one-way analysis of variance (ANOVA), pollution sources, spatio-temporal variations in water quality parameters and differences between stations were revealed. WQI values calculated using annual average water quality data did not show much difference between the streams. The minimum WQI value was measured in Gelevera Stream with 25.69 and the maximum WQI value was measured in Batlama Stream with 32.39 and all streams were classified as good quality ( $25 < WQI < 50$ ). In another study Sener et al. [34] conducted in the Aksu River in the Mediterranean region, WQI results showed that the water quality of the Aksu River is not suitable for drinking, mainly due to industrial, municipal wastes and agricultural activities along the river. The results of the analysis were compared with the maximum permissible limit values recommended by the World Health Organisation and Turkish drinking water standards. Water quality for drinking purposes was assessed using the water quality index (WQI) method. The WQI values calculated in the study are between 35.6133 and 337.5198. The wide range of WQI of the area indicates that it is not reliable for drinking water. In addition, 300-odd values indicate the presence of heavy metal concentration in the water.

**Table 4.** Coefficients of the WAWQI

Parameters	BIS Standards (Sn)	W <sub>n</sub> (Unit Weight)	Mean Observed Value (V <sub>n</sub> )	Q <sub>n</sub> (Quality Rating)	Q <sub>n</sub> *W <sub>n</sub>
<i>EC</i>	250	2.60*10 <sup>-5</sup>	39.19	15.67	4.08*10 <sup>-4</sup>
<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	45	14.47*10 <sup>-5</sup>	1.59	3.53	5.11*10 <sup>-4</sup>
<i>As</i>	0.01	0.65	1,9*10 <sup>-3</sup>	19	12.37
<i>Fe</i>	0.30	0.02	0.01	3.76	0.07
<i>TDS</i>	1000	6.51*10 <sup>-6</sup>	250.15	25.01	1.63*10 <sup>-4</sup>
<i>TA</i>	200	3.26*10 <sup>-5</sup>	189.72	94.86	3.09*10 <sup>-3</sup>
<i>TH</i>	300	2.17*10 <sup>-5</sup>	187.81	62.60	1.36*10 <sup>-3</sup>
<i>DO</i>	5	1.30*10 <sup>-3</sup>	10.18	203.60	0.26
<i>Ni</i>	0.02	0.32	0.002	10	2.78
<b>1</b>					<b>15.50</b>
<b><math>WQI = \sum W_n Q_n / \sum W_n = 15.50</math></b>					

#### 4. Conclusions

This study evaluates the treatment of Doganci dam’s reservoir water and the production of drinking water for Bursa, by addressing 10 water quality parameters and associated standards using different analysis methods. The results of the data obtained by measuring 21 samples taken between January 2021 and June 2021 acquired at weekly frequency are as follows:

- A very strong positive correlation was obtained between EC-TDS (r:0.99), Cu-Ni (r:0.842) and ( $NO_3^-$ )-EC (r:0.80).
- The parameters that do not have a linear relationship were also examined and a high nonlinear relationship was found especially between Fe-Cu.
- The result of WAWQI, which is one of the WQI methods, was obtained as 15.50 and it was interpreted that the drinking water quality for Bursa was at a potable level, and classified as “excellent”.

In addition to the present study, examining the relationships between different indices in future studies will be of great benefit in determining the WQI method on a subject-based basis. Analysing the values obtained by researchers using the WAWQI method using different water quality parameters will contribute to obtaining the details of the method. Continuous inspection of drinking water is an undeniable activity for sustainable water resources management and resilience against climate change. Hence, studies that constantly monitor and develop these activities, accelerate the inspection process of continuous development.

### Acknowledgement

We would like to thank Doburca Drinking Water Facilities for sharing the drinking water parameter values for their contribution to the study. All authors contributed to the understanding and design of the study. Data collection and analysis were performed by D.Y., Material preparation and processing E.A., and interpretation of the analysis and analysis of the results B.V. The first draft of the article was written by D.Y. and the interpretation of the results was carried out by E.A., D.Y. and B.V. All authors have commented on previous versions of the article and have read and approved the latest article.

### References

- [1] Yılmaz, A. (2015). Kuresel Isinmanin Dunya Su Rezervleri Uzerindeki Etkileri. *Kent Akademisi*, 8(22), 63-72.
- [2] United Nations Water (UN-Water). (Retrieved in January, 2023). Humans Rights to Water and Sanitation. <https://www.unwater.org/water-facts/human-rights-water-and-sanitation>
- [3] Rahmanian, N., Ali, S. H. B., Homayoonfard, M., Ali, N. J., Rehan, M., Sadeh, Y., & Nizami, A. S. (2015). Analysis of physiochemical parameters to evaluate the drinking water quality in the State of Perak, Malaysia. *Journal of Chemistry*.
- [4] Levent, B. A. T., Oztekin, A., Sahin, F., Arici, E., & Ozsandikci, U. (2018). An overview of the Black Sea pollution in Turkey. *Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research*, 1(2), 66-86.
- [5] Tokatli, C., & Ustaoglu, F. (2020). Health risk assessment of toxicants in Meriç river delta wetland, Thrace region, Turkey. *Environ Earth Sci* 79: 426.
- [6] Nollet, L. M. L. (2000). *Handbook of Water Analysis*, Marcel Dekker, New York, USA.
- [7] Yüksel, B., Ustaoglu, F., & Arica, E. (2021). Impacts of a garbage disposal facility on the water quality of çavuşlu stream in Giresun, Turkey: A health risk assessment study by a validated ICP-MS assay. *Aquatic sciences and engineering*, 36(4), 181-192.
- [8] Dereli, E. M., Erturk, A., & Cakmakci, M. (2017). Yuzeysel Sularda Agir Metallerin Etkileri Ve Otrofikasyon ile Iliskisi. *Turkish Journal of Aquatic Sciences*, 214-230.
- [9] Cüce, H., Kalipci, E., Ustaoglu, F., Dereli, M. A., & Türkmen, M. (2022). Multivariate statistical and spatial assessment of water quality from a dam threatened by drought at the mid-Anatolia, Cappadocia/Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(5), 441.
- [10] Tokatli, C., Varol, M., & Ustaoglu, F. (2023). Ecological and health risk assessment and quantitative source apportionment of dissolved metals in ponds used for drinking and irrigation purposes. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 52818-52829.
- [11] Ochuko, U., Thaddeus, O., Oghenero, O. A., & John, E. E. (2014). A comparative assessment of water quality index (WQI) and suitability of river Ase for domestic water supply in urban and rural communities in Southern Nigeria. *Int J Human Soc Sci*, 4(1), 234-45
- [12] Akter, T., Johura, F. T., Akter, F., Chowdhury, T. R., Mistry, S. K., Dey, D., & Rahman, M. (2016). Water Quality Index for measuring drinking water quality in rural Bangladesh: a cross-sectional study. *Journal of Health, Population and Nutrition*, 35(1), 1-12.
- [13] Paun, I., Cruceru, L., Chiriac, F. L., Niculescu, M., Vasile, G., & Marin, N. M. (2016). Water Quality Indices-methods for evaluating the quality of drinking water. *Incd Ecoind – International Symposium – Sımi 2016 “The Environment And Industry”*, Proceedings Book
- [14] Anyanwu, E. D., & Emeka, C. S. (2020). Application of water quality index in the drinking water quality assessment of a southeastern Nigeria river. *Food and Environment Safety Journal*, 18(4).
- [15] Al-Ani, I. A. (2019). Mathematical computation of water quality index for the assessment of Al-Hilla river ecosystem. *International Journal of Civil Engineering and Technology*.

- [16] Tong, S., Yang, L., Gong, H., Wang, L., Li, H., Yu, J., ... & Men, Z. (2022). Association of selenium, arsenic, and other trace elements in drinking water and urine in residents of the plateau region in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26498-26512.
- [17] Heydari, M. M., Abbasi, A., Rohani, S. M., & Hosseini, S. M. A. (2013). Correlation study and regression analysis of drinking water quality in Kashan City, Iran. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 10(3), 315-324.
- [18] Solak, S., Kilic, M. Y., & Solmaz, S. K. A. (2019). Bursa ilinde sürdürülebilir kentsel su yönetimi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(1), 111-124.
- [19] İcme suyu arıtma tesisleri Retrieved August 7,2022 from <https://www.buski.gov.tr/Icerik/IcerikDetay?url=Icme-suyu-aritma-tesisleri>
- [20] Ersoz, F. & Ersoz, T. (2020). *Istatistik I*. Seckin Books. (6th edition)
- [21] Daraigan, S. G., Wahdain, A. S., Ba-Mosa, A. S., & Obid, M. H. (2011). Linear correlation analysis study of drinking water quality data for Al-Mukalla City, Hadhramout, Yemen. *International Journal of Environmental Sciences*, 1(7), 1692.
- [22] Palit, D., Mondal, S., & Chattopadhyay, P. (2018). Analyzing water quality index of selected pit-lakes of Raniganj coal field area, India. *Environ Ecol*, 36, 1167-1175.
- [23] Jagadeeswari, P. B., & Ramesh, K. (2012). Water quality index for assessment of water quality in South Chennai coastal aquifer, Tamil Nadu, India. *International Journal of ChemTech Research*, 4(4), 1582-1588.
- [24] Rusydi, A. F. (2018, February). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 118, No. 1, p. 012019). IOP Publishing
- [25] Akgiray, O. (2003). *İcme Suyu Kalitesi Parametreleri*. Tesisat Dergisi, Marmara University.
- [26] Oguz, T. C. (2015). *İcme Suyu Arıtımında Yaygın Olarak Karsilasilan Su Kalite Problemleri Ve Arıtımı İcin Cozum Onerileri*,Uzmanlık Tezi, Ankara.
- [27] Environmental health protection. Retrieved 2022, from <https://dph.illinois.gov/topics-services/environmental-health-protection/private-water/fact-sheets/common-substances-drinking-water.html>
- [28] Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1972). A water quality index-do we dare. *Water and sewage works*, 117(10).
- [29] Rehman, S., Hussain, Z., Zafar, S., Ullah, H., Badshah, S., Ahmad, S. S., ... & Jinnah, F. (2018). Assessment of ground water quality of Dera Ismail Khan, Pakistan, using multivariate statistical approach. *Science*, 37(4), 173-183.
- [30] Mudgal, K. D., Kumari, M., Sharma, D. K., (2009). Hydrochemical analysis of drinking water quality of Alwar district, Rajasthan. *Nat Sci*, 7(2), 30-9.
- [31] Ustaoglu, F., Taş, B., Tepe, Y., & Topaldemir, H. (2021). Comprehensive assessment of water quality and associated health risk by using physicochemical quality indices and multivariate analysis in Terme River, Turkey. *Environmental science and pollution research*, 28(44), 62736-62754.
- [32] García-Ávila, F., Zhindón-Arévalo, C., Valdiviezo-Gonzales, L., Cadme-Galabay, M., Gutiérrez-Ortega, H., & del Pino, L. F. (2022). A comparative study of water quality using two quality indices and a risk index in a drinking water distribution network. *Environmental Technology Reviews*, 11(1), 49-61.
- [33] Aydin, H., Ustaoglu, F., Tepe, Y., & Soylu, E. N. (2021). Assessment of water quality of streams in northeast Turkey by water quality index and multiple statistical methods. *Environmental forensics*, 22(1-2), 270-287.
- [34] Şener, Ş., Şener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). *Science of the Total Environment*, 584, 131-144.

## Bölgesel Su Kalitesi Araştırmaları için Arduino Tabanlı Bir Su Analizi Sistemi Prototipinin Tasarımı

Ebru KARAKÖSE<sup>1\*</sup>, Mehmet Ali IŞIK<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> eozbay@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mehmet36507@gmail.com

(Geliş/Received: 15/08/2023;

Kabul/Accepted: 13/12/2023)

**Öz:** Su, canlıların yaşamlarını devam ettirebilmesi için hayati önem taşımakta ancak artan kirlilik unsurları nedeniyle yapısı giderek bozulmaktadır. Su kalitesinin azaldığı bilinmektedir, bu sebeple su kaynaklarının birçok faktör dikkate alınarak incelenmesi ve buna bağlı olarak gerekli tedbirlerin alınması zorunlu hale gelmektedir. İnsansız su altı araçları, doğal kaynakların korunması, çevrenin denetlenmesi, arama kurtarma çalışması yapılması, su altından numune alınması gibi birçok alanda insan yaşamına yararlı uygulamalar yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, su kirliliğinin araştırılması ve denetlenmesinde kullanılacak, sudaki çözünmüş oksijen seviyesi, sıcaklık ve basınç verilerini alıp daha sonra bu verileri aktararak su kalitesini anlık olarak analiz edilmesini sağlayan bir sistem geliştirilmesi hedeflenmektedir. Geliştirilen Arduino tabanlı sistem, içerisinde suyun analizinin yapılmasını sağlayan farklı sensörler barındırmaktadır. Ayrıca sistem yazılımı sayesinde sensörlerden alınıp işlenen veriler sistem arayüzüne aktarılarak eşzamanlı verilere ulaşılmakta ve sensörlerden normal aralığın dışında bir değer tespit edilmesi halinde sistem uyarı vermektedir. Bu amaçla, öncelikle sistem için gerekli malzemeler tespit edilerek sistem tasarımı yapılmıştır. Daha sonra, sistem yazılımı için uygun kütüphaneler tespit edilerek sistem yazılımı geliştirilmiş ve verilerin alınacağı arayüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yapılan uygulama sayesinde üretilen sistem prototipinin insansız su altı araçlarına entegre edilerek su arıtma sistemleri, balık çiftlikleri, deniz araştırmaları gibi su kaynaklarında kullanılması ve sürdürülebilir yaşama katkı sunulması düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** İnsansız su altı araçları, su analizi, su kalitesi, su kirliliği.

## Design of an Arduino-Based Water Analysis System Prototype for Regional Water Quality Research

**Abstract:** Water is vital for living organisms to survive, but its structure is gradually deteriorating due to increasing pollution. It is known that water quality is decreasing; therefore, it becomes necessary to examine water resources by taking into account many factors and taking necessary precautions accordingly. Unmanned underwater vehicles make it possible to carry out applications beneficial to human life in many areas, such as protecting natural resources, monitoring the environment, conducting search and rescue operations, and taking underwater samples. Within the scope of this study, it is aimed to develop a system that will be used in the research and control of water pollution that allows instantaneous analysis of water quality by obtaining the amount of dissolved oxygen levels in water, temperature, and pressure data, and then transferring these data. The developed Arduino-based system contains different sensors that enable water analysis. In addition, through the system software, the data received from the sensors and processed are transferred to the system interface to access simultaneous data, and if a value outside the normal range is detected from the sensors, the system gives a warning. For this purpose, the system design has been made by first determining the materials required for the system. Subsequently, appropriate libraries for the system software have been identified, the system software has been developed, and the interface from which the data would be received has been designed. It is planned that the system prototype produced through the application will be integrated into unmanned underwater vehicles and used in water resources such as water purification systems, fish farms, marine research, and to contribute to sustainable living.

**Key words:** Unmanned underwater vehicles, water analysis, water quality, water pollution.

### 1. Giriş

Su, tüm yaşam formları için hayati önem taşıyan bir unsurdur. Giderek artan çevre kirliliği, kentleşme, sanayi atıkları, zararlı sızıntılar ve yanlış tüketici uygulamaları gibi nedenlerden dolayı sular kirlenmekte ve bu durum da canlılar için büyük tehlike oluşturmaktadır. Su kalitesi, doğal çevreyi ve besin zincirini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, su kalitesinin ölçülmesi ve açıklanabilmesi için bazı tanımlamalar yapılmış ve uygulanmıştır. Dünya genelinde belirli kurumlar tarafından su kalitesi ölçümü için bazı yönetmelikler ve standartlar belirlenmiştir.

\* Sorumlu yazar: [eozybay@firat.edu.tr](mailto:eozybay@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-1191-6375, <sup>2</sup> 0009-0001-8629-2758

Belirleyici kurumlar ve yerel yönetimler tarafından istenen şartları sağlayacak ölçümler yapılması ve standartların karşılanması beklenmektedir. Su kalitesi ölçümü için farklı yöntemler kullanılmakta ve birçok parametrenin değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle laboratuvar ortamında alınan numuneler için yapılan değerlendirmeler daha doğru ve kesin sonuçlar vermektedir.

Detaylı bir su kalitesi analizi yapılabilmesi için en temelde suyun fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak ayrıntılı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Suyun rengi, tadı, sıcaklığı gibi parametreler fiziksel özelliklerini yansıtırken, pH seviyesi ve çözülmüş oksijen miktarı gibi parametreler ise kimyasal özelliklerini yansıtmaktadır. Suda bulunabilecek biyolojik parametreler ise biyolojik inceleme aşamasında bakılan noktalardır. Ek olarak, çevresel şartlar da su kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir. Bunlar dışında suyun nerede ve ne amaçla kullanılacağı da su kalitesi için gerekli bir parametredir. Örneğin, evlerde insanların içmesi için kullanılacak suyun kalitesi ile endüstriyel amaçlı kullanılacak suyun kalitesinin aynı olması beklenmemelidir. Su kalitesi belirlenen parametrelerde ve istenen standartlara uygun olarak sağlanırsa son kullanıcıya gelene kadar uygun ve sağlıklı bir su tüketimi sağlanmış olur. Ancak, Dünya üzerinde hala kaliteli suya erişemeyen insanlar bulunmakta ve bununla birlikte birçok sağlık problemleri yaşanmaktadır [1-5].

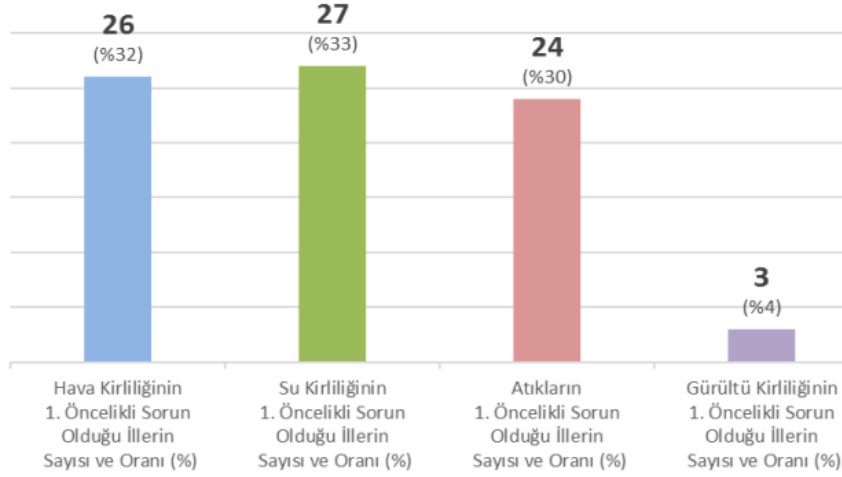
Canlıların yaşamlarını devam ettirebilmesi için çok önemli bir ihtiyaç olan suyun kalitesinin ölçülebilmesi, kirlilik seviyesinin belirlenebilmesi ve buna uygun önlemlerin alınabilmesi için gerekli araştırma ve izleme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu çalışmalar için ise sürdürülebilir ve yenilikçi uygulamaların geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Literatür incelendiğinde çalışma kapsamında hedeflenen konu ile benzer ve kirlilik odaklı çalışmalar olduğu görülmüştür [6-10]. İncelenen çalışmalar içerisinde, Yılmaz vd. [11] tarafından yapılan uygulamada su altı yön ve derinlik denetimi yapabilen bir araç geliştirilmiştir. Ayrıca çalışmada su altı kalitesinin araştırılmasına yönelik bir uygulama da önerilmiştir. Zeydan vd. [12] ise belirli bölgelerden su numuneleri alınarak laboratuvar ortamında kalite analizlerinin yapıldığı bir çalışma tasarlamışlardır. Yine Yılmaz vd. [13] tarafından yapılan başka bir çalışmada sualtı araçlarının genel tasarım aşamasında otonom çalışabilmeleri için gerekli olan ilkeler incelenmiştir. Çalışmada ek olarak mekanik, iç donanım ve algoritma konuları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Vasilijevic vd. [14] su altı araçlarının konumlarının tespiti için sensör füzyonu tasarımı geliştirmişlerdir. Sensör füzyonu ile sensörlerden elde edilen veriler işlenerek algoritma, filtre veya yapay zekâ ile değerlendirilir. Bu sayede su altı araçlarının konumunu tespit etmek için bir çalışma önerilmiştir. Manoj vd. [15] su altı sensörleri kullanılarak balık havuzları için su kalitesinin izlendiği bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada su kalitesini belirleyen söz konusu parametreleri izlemek için sensörler, arduino, raspberry pi tabanlı bir sistem geliştirerek tam otomatik, insansız bir balık yetiştirme sistemi önerilmiştir. Shuo vd. [16] yaptıkları çalışmada, su kalitesi izleme ve numune alma konusunda otonom bir araç tasarlamışlardır. Bu sayede, belirledikleri rotaya otonom olarak hareket eden ve o bölgelerden numune alarak su kalitesini izleyen bir araç önermişlerdir. IoT teknolojisinin kullanılarak havuzlardaki su kalitesinin incelenmesinin önerildiği diğer bir çalışmada, yüzme havuzlarındaki suyun sıcaklık ve pH seviyesinin anlık olarak takip edilmesi amaçlanmıştır. İlgili sistem, pH seviyesinin hedef değer aralıklarının dışına çıkması halinde kısa mesaj ile bildirim yapabilmekte ve sisteme dâhil olan pompalar ile suyun pH seviyesinin otomatik olarak dengede tutulmasını sağlamaktadır [17]. Bu alanda yapılan diğer çalışmalarda IoT teknolojisi ve derin öğrenme uygulamaları kullanılarak iletim, veri toplama ve gerçek zamanlı su kalitesinin izlenmesi yöntemlerini içeren sistemler de önerilmiştir. Yapılan farklı çalışmalar incelendiğinde ise değişik amaçlar için kullanılabilir otonom su altı araçlarının geliştirilmesini hedefleyen uygulamaların olduğu görülmüştür. Ayrıca numunelerin toplanarak laboratuvar ortamında su kalitesinin analiz edildiği araştırmaların olduğu da anlaşılmaktadır [18-24].

Bu çalışmada, numune alma gereksinimi bulunmadan istenilen bölgede su analizi gerçekleştiren, su kalitesinde meydana gelebilecek anormal değişiklikleri eş zamanlı saptayarak meydana gelen değişiklikleri analiz edebilecek bir sistem önerilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle literatür incelemesi verilmiş ve ardından yöntem ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Daha sonra önerilen algoritma açıklanarak elde edilen bulgular verilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

### 1.1. Problemin tanımı

Dünyamızın %75'i okyanus, deniz, göl, nehir gibi su kaynaklarından oluşmaktadır. Ancak artan nüfus ve sanayileşme gibi faktörlere bağlı olarak endüstriyel atıkların çoğalması canlılar için hayati önem taşıyan su kaynaklarımızın her geçen gün giderek daha fazla kirlenmesine ve su kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Türkiye'de yapılan araştırmalarda da illere göre çevre kirliliği sorunları istatistikinde su kirliliğinin önemli bir sorun olduğu tespit edilmiştir [25]. Şekil 1'de, Türkiye'deki illere göre 1. öncelikli kirlilik sorunları grafiği verilmiştir.





Şekil 1. Türkiye'deki illerin 1. öncelikli sorunları istatistiği [25].

Özellikle ülkemizde yaşanan müsilaj sorunundan sonra Bilim-2 gemisi ile yapılan araştırmalarda Ege Denizindeki oksijen miktarının önceki yıllara göre azalarak bir tehdit oluşturduğu saptanmıştır [26]. Ayrıca tarım alanlarından kaynaklı kirleticiler, yeterli arıtma yapılmamış evsel ve endüstriyel atık su deşarjları nedeniyle sucul ekosistemler kendini temizleyebilme kapasitesini kaybetmekte ve su kalitesi olumsuz etkilenmektedir. Bu durum suyun kullanım alanlarını olumsuz etkilenmekte ve su ortamında yaşayan canlıların varlığını da tehlikeye atmaktadır [27,28].

Suları kirletme potansiyeli bakımından kirletici kaynakları; tarımsal atıklar, kanalizasyon atıkları, asit maden suları, petrol ve yağ kirlenmeleri, endüstriyel organik atıklar, endüstriyel inorganik atıklar olarak sıralanabilir. Yüzeysel sularında doğal olarak bulunan veya kirletici kaynaklardan sulara ulaşan çeşitli organik maddeler, ortamdaki mikroorganizmaların aktiviteleri sonucu anaerobik veya aerobik olarak belirli düzeyde ayrışır ve bu sırada suyun oksijen dengesini etkilerler [29]. Su kalitesini etkileyen en önemli faktörlerden biri suda çözülmüş oksijen miktarıdır. Bitki ve hayvanların yaşamasına yetecek kadar çözülmüş oksijene sahip olmaması sudaki kirliliğin başlıca göstergesidir.

Yapılan araştırmalarda sıcak sularda canlıların, özellikle de balıkların yaşayabilmeleri için suyun litresinde en az 5 mg, soğuk sular için ise en az 6 mg çözülmüş oksijene ihtiyaçları olduğu görülmüştür. Sudaki doymuş oksijen miktarı sıcaklığa ve basınca göre değişmektedir. Deniz seviyesinde 20°C de oksijenin suda çözünürlüğü 9,1 mg/L, aynı sıcaklıkta 1000 m yükseklikte 8,2 mg/L, 2000 m yükseklikte 7,4 mg/L'dir. Buna karşın 0°C'de 14,6 mg/L; 18°C'de 9,5 mg/L; 30°C'de 7,6 mg/L çözünürlüğe sahip olduğu görülmüştür [30]. Tablo 1'de bazı su canlıları için uygun su sıcaklığı değerleri ve çözülmüş oksijen miktarı değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Bazı su canlıları için uygun su sıcaklığı ve çözülmüş oksijen miktarı değerleri [30].

Canlının İsmi	Optimum Su Sıcaklığı (°C)	Optimum Çözülmüş Oksijen Mik. (mg/L)
<b>Kalkan</b> ( <i>Scophthalmus Maximus</i> )	6-22	4.5-8
<b>Somon Balığı</b> ( <i>Salmo Salar</i> )	2-18	5-10
<b>Aynalı Sazan</b> ( <i>Cyprinus Carpio</i> )	1-30	4-7
<b>Kara Midye</b> ( <i>Mytilus Galloprovincialis</i> )	6-24	2-8
<b>Çipura</b> ( <i>Sparus Aurata</i> )	6-32	4.5-8
<b>Gökkuşluğu Alabalığı</b> ( <i>Oncorhynchus Mykiss</i> )	1-20	5-10

Bu çalışmada, suyun sıcaklığı, çözünmüş oksijen miktarı gibi bilgilere anlık olarak ulaşılmasına imkân sağlayacak, su kalitesinin kontrollerini gerçekleştiren, risklere karşı veriler elde eden ve denetim sağlayan bir sistem geliştirmesi planlanmıştır. Gerçekleştirilen uygulama ile kirletilen su kaynaklarının eşzamanlı tespit edilmesi hedeflenmektedir. Böylece, su kaynaklarının ıslah edilmesine, tatlı ve tuzlu doğal su kaynaklarının korunarak canlılar için sağlıklı bir yaşam ortamının sürdürülmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda öncelikle sudaki çözünmüş oksijen miktarı, sıcaklık, derinlik gibi bilgileri alarak su kalitesinin tespit edilmesini sağlayan bir sistem geliştirilmiş ve uygulanabilir hale getirilmiştir. Daha sonra sistemden alınan veriler aktarılarak, su kalitesinde bozulma yaşandığında da uyarı veren bir arayüz yazılımı gerçekleştirilmiştir.

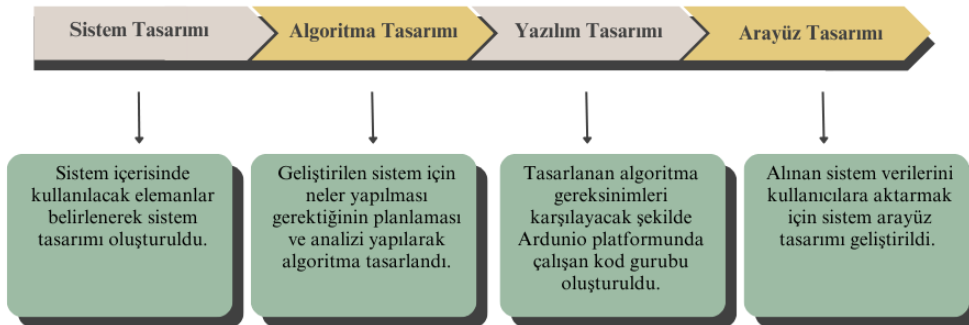
## 2. Yöntem

Önerilen su kalitesi analiz sistemi; oksijen sensörü, 3 eksenli jiroskop, arduino mega (mikro denetleyici), basınç ve derinlik sensörü, canbus (seri haberleşme portu), haberleşme kablosu gibi elektronik malzemelerden oluşan bir sistemdir. Tasarlanan su altı kitinin, insansız su altı araçları, tekneler ya da sızdırmaz bir haznenin içine entegre edilerek uygun alanlarda kullanılabilir düzeyde olması istenmektedir. Sistemde kullanılan elektronik parçalar ve açıklamaları Tablo 2’de verilmiştir. Bu çalışmada, öncelikle kullanılacak elektronik parçalar belirlenerek sistem tasarımı oluşturulmuştur. Oluşturulan sistemin analizi ve planlaması yapılarak algoritma tasarımı yapılmış ve akış şemasına dönüştürülmüştür. Tasarlanan algoritma gereksinimlerini karşılayacak şekilde Arduino platformunda çalışan kod gurubu oluşturulmuştur. Son olarak ise sistem verilerine ve uyarılara kolay erişim sağlamak amacıyla arayüz tasarımı geliştirilmiştir. Önerilen yöntemin tasarım aşamaları Şekil 2’de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Elektronik elemanların listesi.

ELEKTRONİK PARÇALAR	AÇIKLAMA	MARKA/MODEL
Oksijen Sensörü	Su içerisindeki çözünmüş oksijen miktarının ölçülmesi	Gravity Oksijen sensörü
Sıcaklık ve Nem Sensörü	Su içindeki sıcaklık değerinin ölçülmesi	SI7021
Basınç Sensörü	Su basıncının ölçülerek derinlik verisi alınması	Lenta Marine
Mikro Denetleyici	Sistemdeki yazılımsal kontrol ve komut işlemlerinin yapılması	Arduino Uno
Haberleşme ve Güç Kabloları	Sistem içerisinde bulunan tüm sensör ve elektronik bileşenler arası iletişimin sağlanması	

## Yöntem Aşamaları



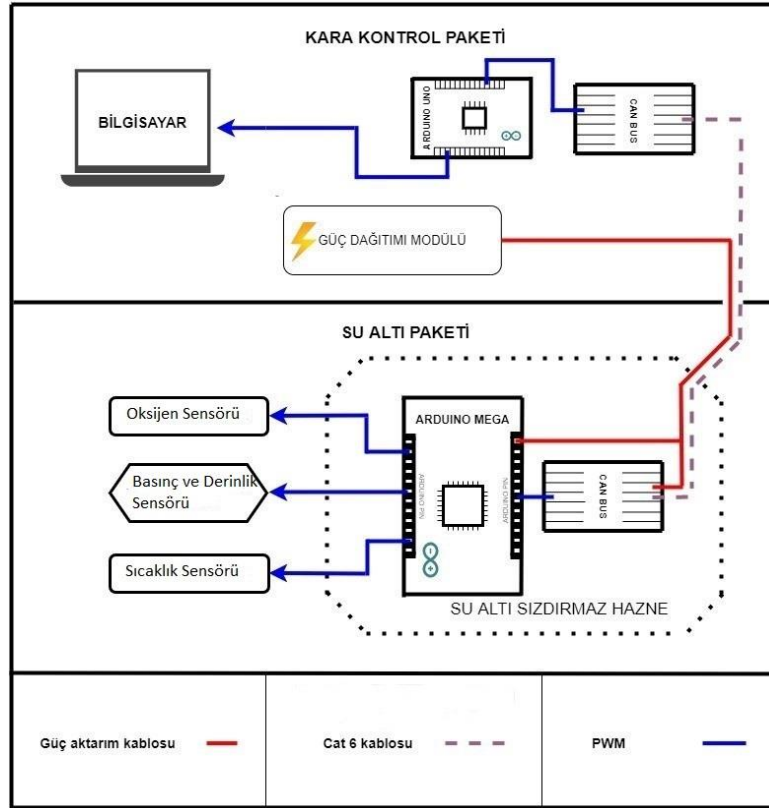
**Şekil 2.** Yöntem tasarım aşamaları.

## 2.1. Sistem tasarımı

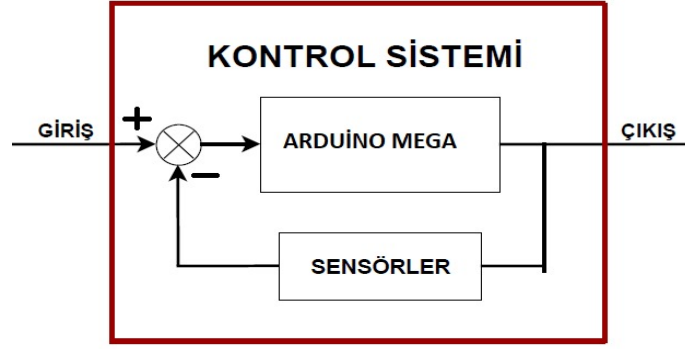
Çalışmada oluşturulan su altı kiti iki ana üniteden oluşmaktadır. Bu üniteler su altı veri paketi ve kara kontrol paketidir. Su altı veri paketinden giden sinyaller seri haberleşme kablosu ile kara kontrol paketine iletilerek bilgi aktarımı gerçekleştirilmektedir.

- **Su altı veri paketi:** Oksijen sensörü, Arduino mega, canbus, seri haberleşme kablosu gibi elektronik parçalardan oluşmaktadır. Arduino mega, jiroskop ve canbus gibi sudan etkilenecek elektronik parçalar sudan izole edilmiştir. Oksijen sensörü, derinlik sensörü ve sıcaklık sensörü gibi elemanlar ise su ile temas halinde bulunmaktadır.
- **Kara kontrol paketi:** Canbus, Arduino uno ve ekran/kullanıcı bilgisayarından oluşmaktadır.

Oksijen sensörü üzerindeki galvin prop (galvanik uç) ile sudaki çözünmüş oksijeni mg/L cinsinden anlık olarak ölçülür. Basınç sensörü de sudaki derinlik hakkında bilgi verir ve konum algoritmasına yardımcı olur. Arduino mega, su altı sensörlerinden gelen analog ve lojik sinyalleri kendi gömülü devreleri ve yazılımı ile işleyerek anlamlı değerlere çevirip, canbusa aktarır. Canbus ise su altı paketi ve kara kontrol paketi arasında seri haberleşmeyi sağlayan elektronik baskı devre kartıdır. Bu devre haberleşme kablosuyla kara kontrol paketine verinin iletilmesini sağlar. Kara kontrol paketi, seri haberleşme kablosundan gelen veriyi kendi modülünde bulunan canbus ile işler, mikro denetleyici olan Arduino Uno'ya aktarır. Arduino uno, bir kullanıcı ekranına sahip ise ona aktarır ya da kullanıcı bilgisayarındaki Arduino IDE verileri izler. Şekil 3'te sistem tasarımının elektronik şeması ve Şekil 4'te kontrol sistemi su altı veri paketi blok diyagramı verilmiştir. Blok diyagramında giriş, sisteme giren temel sensör verilerini ve yazılımsal girdileri temsil eder. Arduino bloğu, verileri almak, işlemek ve kontrol etmek için kullanılan mikro denetleyici veya kontrol ünitesini gösterir. Yani Arduino, gelen verileri işler, kararlar alır ayrıca çeşitli sensörlerden ve veri kaynaklarından bilgi toplar. Sensörler bloğu, bir geri besleme bloğudur. Sistemdeki sensörler, çevresel verileri ölçer ve sürecin kontrolünü sağlamak için arduinoya iletir. Blok diyagramı çıkışı ise sistemden gelen sonuçları temsil eder.



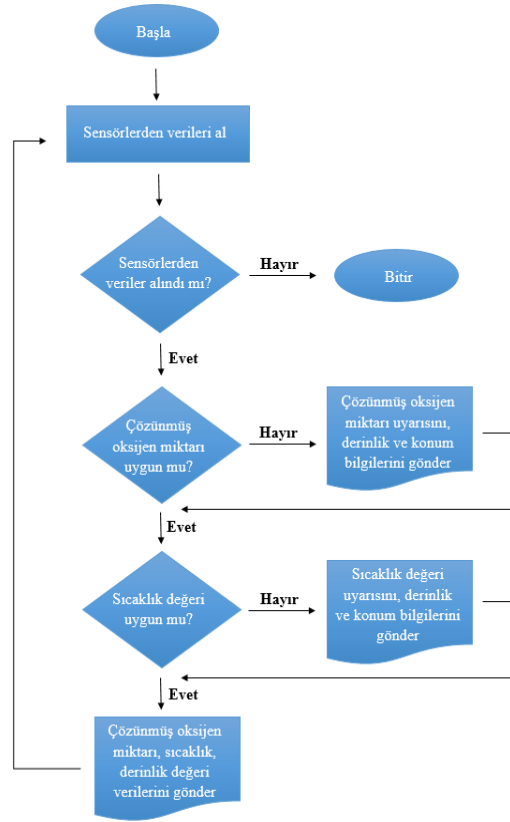
Şekil 3. Tasarlanan sistemin elektronik şeması.



Şekil 4. Kontrol sistemi su altı veri paketi için blok diyagramı.

## 2.2. Algoritma tasarımı

Yazılım uygulamalarında kodlamadan önce planlama, analiz ve tasarım aşamaları gelir. Bu çalışmada geliştirilen sistem için ilk olarak neler yapılması gerektiğinin planlaması yapılmış daha sonra analizi gerçekleştirilip, algoritması tasarlanmıştır. Bu algoritmanın genel hatları UML (Unified Modeling Language) diyagramları ile görsel olarak ortaya koyulmuştur. Gerçekleştirilen algoritmaya göre sistem ilk olarak kullanılan sensörlerden verileri toplamakta daha sonra sensörlerden alınan bu verileri belirlenen her bir sınır değerine göre işlemektedir. İşlenen bu verilerden her biri belirlenen sınır değerlerinin dışına çıkarsa sistem arayüze uyarı bilgisi göndermektedir. Aynı zamanda tüm veri değerleri arayüz üzerinden görüntülenebilmektedir. Sistemin algoritma şeması Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Sistem algoritma tasarımının UML diyagramı.

### 2.3. Yazılım tasarımı

Çalışma kapsamında yazılmış olan aşağıdaki kod grubu, Arduino platformunda çalışan suyun sıcaklığını, çözünmüş oksijen seviyesini ve su derinliğini ölçmek için üç farklı sensörü kullanan bir Arduino programıdır. Gerekli tanımlamalar yapıldıktan sonra kullanılan pinler ve sabit değerler belirlenir. Örneğin, ana döngü olan loop fonksiyonunda A1 pinine bağlanan çözünmüş oksijen sensöründen suyun içindeki çözünmüş oksijen miktarı verisi, 2 numaralı pine bağlı olan su geçirmez sıcaklık sensöründen su sıcaklık verisi alınır. Son olarak, derinlik ölçümü için A0 pinine bağlı basınç sensöründen alınan basınç değeri verisi kullanılır. Yazılan kod sayesinde basınç değişimi verisi derinlik değişimine dönüştürülür. Şekil 6'da tanımlamaların yapıldığı ilk giriş kod bloğu ve Şekil 7'de değişken ve sabit fonksiyonların tanımlandığı kod bloğu verilmiştir.

```

1  #include <Arduino.h>
2  #include <OneWire.h>
3  #include <DallasTemperature.h>
4  #include <Wire.h>
5
6  #define DO_PIN A1
7  #define VREF 5000 //VREF (mv)
8  #define ADC_RES 1024 //ADC Resolution
9
10 #define ONE_WIRE_BUS 2
11 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
12 DallasTemperature sensors(&oneWire);
13 DeviceAddress insideThermometer;
14
15 //Single-point calibration Mode=0
16 //Two-point calibration Mode=1
17 #define TWO_POINT_CALIBRATION 0
18
19 #define READ_TEMP (10) //Current water temperature °C, Or temperature sensor function
20
21 //Single point calibration needs to be filled CAL1_V and CAL1_T
22 #define CAL1_V (1855) //mv
23 #define CAL1_T (20) //°C
24 //Two-point calibration needs to be filled CAL2_V and CAL2_T
25 //CAL1 High temperature point, CAL2 Low temperature point
26 #define CAL2_V (1300) //mv
27 #define CAL2_T (15) //°C
28
29 const uint16_t DO_Table[41] = {
30     14460, 14220, 13820, 13440, 13090, 12740, 12420, 12110, 11810, 11530,
31     11260, 11010, 10770, 10530, 10300, 10080, 9860, 9660, 9460, 9270,
32     9080, 8900, 8730, 8570, 8410, 8250, 8110, 7960, 7820, 7690,
33     7560, 7430, 7300, 7180, 7070, 6950, 6840, 6730, 6630, 6530, 6410};
34

```

Şekil 6. Tanımlamaların yapıldığı ilk giriş kod bloğu.

```

35 const int pressureInput = A0; // Basınç transdüseri için analog giriş pini
36 const float pressureZero = 94; // 0 psi'da basınç transdüserinin analog okuması
37 const int pressureMax = 1140; // 100 psi'da basınç transdüserinin analog okuması
38 const int pressureTransducerMaxPSI = 174; // Kullanılan transdüserin psi değeri
39 const int baudRate = 9600; // Seri monitör için baud hızı
40 const int sensorreadDelay = 250; // Sensör okuma gecikmesi
41
42 float firstSensorValue = 0; // birinci sensörden okunan değer
43
44 float pressureChangePerCM = 0.5 / 35; // her 35 cm'deki basınç değişimi
45 float cmToPsiConversion = 1 / 2.54; // santimetreyi psi'ye dönüştürme faktörü
46
47 uint8_t Temperature;
48 uint16_t ADC_Raw;
49 uint16_t ADC_Voltage;
50 uint16_t DO;
51
52 int16_t readDO(uint32_t voltage_mv, uint8_t temperature_c)
53 {
54     #if TWO_POINT_CALIBRATION == 0
55         uint16_t V_saturation = (uint32_t)CAL1_V + (uint32_t)35 * temperature_c - (uint32_t)CAL1_T * 35;
56         return (voltage_mv * DO_Table[temperature_c] / V_saturation);
57     #else
58         uint16_t V_saturation = (int16_t)((int8_t)temperature_c - CAL2_T) * ((uint16_t)CAL1_V - CAL2_V) / ((uint8_t)CAL1_T - CAL2_T) + CAL2_V;
59         return (voltage_mv * DO_Table[temperature_c] / V_saturation);
60     #endif
61 }
62 float printTemperature(DeviceAddress deviceAddress)
63 {
64     float tempC = sensors.getTempC(deviceAddress);
65     if(tempC == DEVICE_DISCONNECTED_C)
66     {
67         Serial.println("Error: Could not read temperature data");
68         return;

```

Şekil 7. Hesaplamaların yapıldığı kod bloğu.

Kodlar sayesinde su içinde bulunan sensörlerden elde edilen suyun sıcaklığı, çözülmüş oksijen miktarı, derinlik değeri bilgileri seri monitör ekranına aktarılmış olur. Bu verileri kullanarak suyun kalitesi ve derinlik değişimi izlenebilmektedir. Şekil 8’de kurulumun yapıldığı kod bloğu ve Şekil 9’da çıktıların alındığı ve seri monitöre yazdırıldığı döngü kod bloğu verilmiştir.

```

68     return;
69   }
70 }
71 return tempC;
72 }
73
74 void printAddress(DeviceAddress deviceAddress)
75 {
76   for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
77   {
78     if (deviceAddress[i] < 16) Serial.print("0");
79     Serial.print(deviceAddress[i], HEX);
80   }
81 }
82
83 void setup()
84 {
85   Serial.begin(9600);
86
87   Serial.print("Locating devices...");
88   sensors.begin();
89   Serial.print("Found ");
90   Serial.print(sensors.getDeviceCount(), DEC);
91   Serial.println(" devices.");
92
93   // report parasite power requirements
94   Serial.print("Parasite power is: ");
95   if (sensors.isParasitePowerMode()) Serial.println("ON");
96   else Serial.println("OFF");
97
98   if (!sensors.getAddress(insideThermometer, 0)) Serial.println("Unable to find address for Device 0");
99
100

```

Şekil 8. Kurulumun yapıldığı kod bloğu.

```

100 Serial.print("Device 0 Address: ");
101 printAddress(insideThermometer);
102 Serial.println();
103 sensors.setResolution(insideThermometer, 9);
104
105 Serial.print("Device 0 Resolution: ");
106 Serial.print(sensors.getResolution(insideThermometer), DEC);
107 Serial.println();
108 }
109
110 void loop()
111 {
112   firstSensorValue = analogRead(pressureInput); // birinci sensörden analog değeri oku
113   firstSensorValue = ((firstSensorValue - pressureZero) * pressuretransducermaxPSI) / (pressureMax - pressureZero); // birinci sensörün psi değerine dönüştür
114
115   float pressureChange = firstSensorValue * cmToPsiConversion; // basınç değişimini hesapla
116   float depthChange = pressureChange / pressureChangePerCM; // derinlik değişimini hesapla
117
118
119   Serial.print("Derinlik (cm): ");
120   Serial.println(depthChange);
121
122   Temperature = (uint8_t) printTemperature(insideThermometer);
123   ADC_Raw = analogRead(DO_PIN);
124   ADC_Voltage = uint32_t(VREF) * ADC_Raw / ADC_RES;
125
126   Serial.print("Sıcaklık:\t" + String(Temperature) + "\t");
127   //Serial.print("ADC RAW:\t" + String(ADC_Raw) + "\t");
128   //Serial.print("ADC Voltage:\t" + String(ADC_Voltage) + "\t");
129   Serial.println("çözülmüş oksijen:\t" + String(readDO(ADC_Voltage, Temperature)/1000) + "\t");
130
131   delay(1000);
132 }

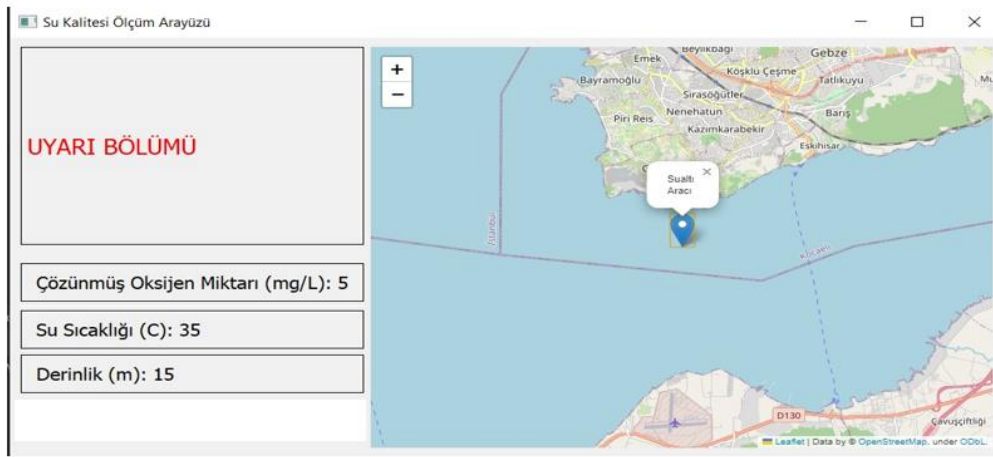
```

Şekil 9. Çıktıların alındığı ve seri monitöre yazdırıldığı döngü kod bloğu.

Aynı zamanda, Python programı, Arduino ile seri iletişim kurarak verileri okuyabilir. Python programı ile tasarlanan kod fonksiyonları sayesinde seri monitör ekranında görülen veriler, arayüz ekranından takip edilmiştir. Arduino ile ölçülen su sıcaklığı, çözünmüş oksijen seviyesi ve su derinliği gibi veriler Python ile tasarlanan arayüz ekranına aktarılmıştır. Böylece, bu veriler anlık olarak görüntülenmiştir.

## 2.4. Arayüz tasarımı

Arayüz tasarımında Pythonun bir geliştirme ortamı olan Pycharm IDE kullanılmış ve visual studio grafiklerinden yararlanılmıştır. Geliştirilen algoritmaya göre sistem ilk olarak sensörlerden verileri toplamakta daha sonra sensörlerden alınan veriler, kod bloklarında belirlenen her bir sınır değere göre işlemektedir. İşlenen bu verilerden her biri tarafımızca belirlenen sınır değerlerinin dışına çıkarsa sistem arayüze uyarı bilgisi göndermektedir. Arayüz kullanıcı dostu olup verileri daha hızlı ve efektif analiz etmeye olanak sağlamaktadır. Şekil 10'da sistem arayüz tasarımı ekranı verilmiştir.

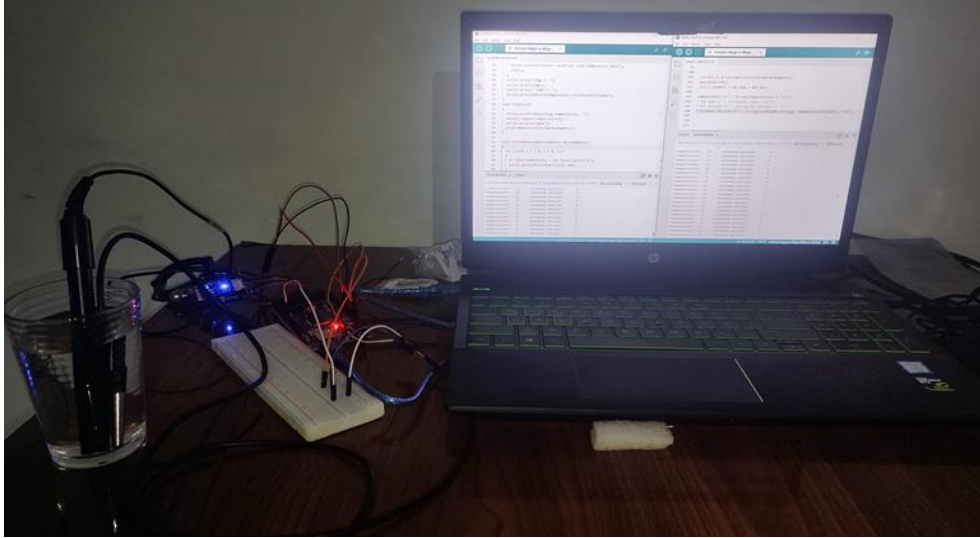


Şekil 10. Sistem arayüz tasarım ekranı.

## 3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma, Arduino tabanlı bir su analizi sistemi prototipinin oluşturulmasını kapsamaktadır. Sistem, önemli su parametrelerini içeren çözünmüş oksijen miktarı, derinlik ve sıcaklık gibi değerleri ölçen sensörlerle donatılmıştır. Geliştirilen sistemin kodları, Arduino geliştirme kartına yüklenerek sistemin işlevselliği sağlanmıştır. Ayrıca, algoritma blok diyagramı Python'ın geliştirme ortamı olan PyCharm IDE'de tasarlanmış ve bu algoritma Arduino üzerinde derlenmiştir. Kod blokları tamamlandıktan sonra, sensörler Arduino kartına entegre edilerek sistem başarıyla çalıştırılmıştır. Yapılan deneylerde, çözünmüş oksijen miktarı, sıcaklık ve basınç değerlerini ölçen sensörlerden doğru ve sağlıklı veriler elde edilmiştir. Bu veriler, sistemin doğruluk ve güvenilirlik açısından başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu aşamalar, sistem prototipinin temel işlevselliğini ve su analizi yeteneklerini doğrulamak için önemli adımlardır.

Çalışma kapsamında, gerçekleştirilen tasarım ve kodlama süreçleri, dikkatli bir planlama, analiz ve test sürecini içermiştir. Algoritma ve yazılım tasarımı, su kalitesi ile ilgili verilerin etkili bir şekilde işlenmesini ve anlamlı sonuçlar elde edilmesini hedeflemiştir. Bu durum, su kaynaklarının yönetimi, su kirliliğinin izlenmesi ve su ekosistemlerinin korunması gibi önemli konularda çözümler sunmak için büyük önem taşımaktadır. Şekil 11'de yapılan sisteme ait iki veri paketinin birleştirilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 11. Çalışmada önerilen iki veri paketinin birleştirilmesi.

Gerçekleştirilen denemelerde, çözülmüş oksijen miktarını, sıcaklık ve basınç değerlerini ölçen sensörlerden doğru verilerin alınması sağlanmıştır. Deneyler oda sıcaklığında içi su dolu bir cam kaptaki gerçekleştirilmiştir. İlk denemelerde suyun sıcaklık değeri 21 °C ve çözülmüş oksijen değeri 3 mg/L olarak bulunmuştur. Bu deneyden sonra sensör kalibrasyon ayarlarının yapılması gerektiği tespit edilmiştir. Şekil 12'de ilk deneme sonucunda Arduino IDE'ye iletilen verilerin görüntüsü yer almaktadır.

```
101 (uint32_t) printTemperature(insideTemperature);  
102 digitalWrite(DO_PIN);  
103 uint32_t(VREF) * ADC_Raw / ADC_RES;  
104  
105 Temperaturet:\t" + String(Temperaturet) + "\t";  
106 ("ADC RAW:\t" + String(ADC_Raw) + "\t");  
107 ("ADC Voltage:\t" + String(ADC_Voltage) + "\t");  
108 ("çözülmüş oksijen:\t" + String(readDO(ADC_Voltage, Temperaturet)  
109  
110  
111
```

Output Serial Monitor x

Message (Enter to send message to 'Arduino Mega or Mega 2560' on 'COM10' No Line Ending

Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3
Temperaturet:	21	çözülmüş oksijen:	3

Şekil 12. Arduino IDE'ye iletilen verilerin görüntülenmesi.

Oksijen sensörünün probunda parçalanmış oksijen atomları analog sinyal ile çevrilerek Arduino geliştirme kartına iletilir. Basınç sensöründe ise algılanan analog basınç Arduino IDE'ye iletilir. Alınan bu analog sinyaller kod içinde çevrilerek bilgisayar bilgi ekranına ya da sistem arayüzüne aktarılır. Sisteme basınç sensörü de dahil edilerek bütün sensörlerin kalibrasyonları gerçekleştirildikten sonra yapılan denemede suyun sıcaklık değeri 25 °C, derinlik değeri 4.58 cm, çözülmüş oksijen miktarı değeri 6 mg/L olarak bulunmuştur. Gerekli kalibrasyonlar yapıldıktan sonra gerçekleştirilen deneme sonucunda Arduino seri monitöründen alınan veriler Şekil 13'te gösterilmiştir.



15:56:48.048 -> Derinlik (cm):	4.58		
15:56:48.048 -> Sıcaklık:	25	çözünmüş oksijen:	6
15:56:49.074 -> Derinlik (cm):	4.58		
15:56:49.074 -> Sıcaklık:	25	çözünmüş oksijen:	6
15:56:50.079 -> Derinlik (cm):	4.58		
15:56:50.079 -> Sıcaklık:	25	çözünmüş oksijen:	6
15:56:51.101 -> Derinlik (cm):	4.58		
15:56:51.101 -> Sıcaklık:	25	çözünmüş oksijen:	6
15:56:52.133 -> Derinlik (cm):	4.58		
15:56:52.133 -> Sıcaklık:	25	çözünmüş oksijen:	6
15:56:53.154 -> Derinlik (cm):	4.58		
15:56:53.154 -> Sıcaklık:	25	çözünmüş oksijen:	6

**Şekil 13.** Arduino seri monitöründen alınan veriler.

Ayrıca, tasarlanan arayüz ekranında uyarı bölümü de bulunmaktadır. Sistem tarafından sensörlerden alınan veriler, kod bloklarında belirlenen her bir sınır değerine göre işlenmektedir. Alınan veriler, belirlenen sınır değerlerinin dışında bir değer olarak elde edilir ise sistem arayüze uyarı bilgisi göndermektedir. Bu sayede sudaki istenmeyen durumlar tespit edilebilmekte ve böylece önlem alınması sağlanmaktadır. Sudaki çözünmüş oksijen miktarı, tuzluluk oranı artışı, sıcaklığın yükselmesi ve basıncın düşmesiyle azalmaktadır. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda balıkların çoğunun büyüme ve üreme faaliyetlerini devam ettirebilmeleri için en düşük 5 mg/L oksijene ihtiyacı olduğu tespit edilmiştir. Su sıcaklığının yükselmesinden kaynaklı olarak da su canlılarının faaliyetlerinin olumsuz etkilendiği görülmüştür [31]. Sınır değerleri verilen referanslar ve Tablo1’de verilen değerler doğrultusunda belirlenmiştir. Belirlenen sınır değerler; çözünmüş oksijen miktarı değeri için en az 5 mg/L, sıcaklık değeri için en düşük 6 °C, en fazla 35 °C olarak seçilmiştir. Aynı zamanda kullanılan basınç sensörü sayesinde ölçüm aralığı olarak 15 metreye kadar derinlik bilgisi alınabilmektedir. Arayüz uyarı sistemi için sınır dışı değerler ortaya çıkması durumunda elde edilen ekran görüntüsü Şekil 14’te verilmiştir.



**Şekil 14.** Arayüz uyarı ekranı.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışma kapsamında, su kalitesi analiz sistemi prototipi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Geliştirilen su analizi sistemi, su altındaki çevresel değişkenlerin izlenmesi, su kalitesiyle ilgili verilerin kolaylıkla elde edilmesi, su kirliliğinin araştırılması ve denetlenmesinde etkili bir araç olma potansiyeline sahiptir. Ayrıca sistem, Arduino tabanlı tasarımı sayesinde su altı araçlarına entegre edilebilirlik özelliği taşımakta ve sensörlerden elde edilen verilerin analizi ile su kalitesi hakkında anlık bilgilere erişim sağlanabilmektedir. Bu yönüyle çalışma, literatüre katkı sunmakta ve yeni sistemler geliştirilmesinin öncülüğünü yapacağı düşünülmektedir.

Tasarım aşamasında öncelikle oksijen sensörü, sıcaklık sensörü, basınç sensörü, Arduino mega (mikro denetleyici) ve haberleşme kablosu gibi elektronik parçalardan oluşan bir su altı kiti geliştirilmiştir. Daha sonra Arduino platformunda çalışan kod grubu oluşturulmuştur. Yazılım, suyun sıcaklığını, çözünmüş oksijen miktarı seviyesini ve su derinliğini seri monitör ekranına aktararak anlık olarak izlenmesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemin çözülmüş oksijen miktarı, derinlik, sıcaklık değerleri ölçümünü ve eşzamanlı veri transferini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermiştir. Çalışmada, oda sıcaklığında içi su dolu cam bir kaptaki gerçekleştirilen deneylerde su sıcaklık değeri sensörlerin gerekli kalibrasyonları yapıldıktan sonra 25 °C, derinlik değeri 4.58 cm ve çözülmüş oksijen miktarı değeri 6 mg/L olarak bulunmuş ve bu değerlerin belirlenen sınır değerlere uygun olduğu görülmüştür. Ek olarak, sistemin uyarı mekanizması sayesinde sorunlu durumlar tespit edilebilmekte ve zamanında müdahale imkânı sağlanmaktadır. Bunun dışında, çalışmada geliştirilmiş olan su analiz sistemi prototipinin ileriki çalışmalar ile nihai ürüne dönüştürülmesi durumunda, su arıtma sistemleri, balık çiftlikleri, deniz araştırmaları gibi çeşitli su kaynaklarında kullanılabilmesi mümkündür. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, sisteme eklenecek olan pH sensörü gibi sensörlerin çeşitliliği ve özellikleri artırılabilir böylece farklı parametrelerin ölçümü sağlanabilir. Ayrıca, verilerin uzaktan izlenebilmesi ve analiz edilebilmesi için iletişim modülleri veya veri kaydedici gibi özelliklerin de sisteme eklenmesi düşünülebilir.

## Teşekkür

Makalede sunulan çalışmalar, 1919B012210474 nolu TÜBİTAK 2209-A projesi kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Zulkifli CZ, Garfan S, Talal M, Alamoodi AH, Alamlah A, Ahmaro IYY, Sulaiman S, Ibrahim AB, Zaidan BB, Ismail AR, Albahri OS, Albahri AS, Soon CF, Harun NH, Chiang HH. IoT-Based Water Monitoring Systems: A Systematic Review. *Water*, 2022; 14: 3621.
- [2] Gunia M, Laine M, Malve O, Kallio K, Kervinen M, Anttila S, Kotamaki N, Siivola E, Kettunen J, Kauranne T. Data Fusion System for Monitoring Water Quality: Application to Chlorophyll-A in Baltic Sea Coast. *Environmental Modelling & Software*, September 2022; 155: 105465.
- [3] Liu Q. Intelligent Water Quality Monitoring System Based on Multi-Sensor Data Fusion Technology. *International Journal of Ambient Computing and Intelligence (IJACI)*, 2021; 12(4): 21.
- [4] Zhu M, Wang J, Yang X, Zhang Y, Zhang L, Ren H, Wu B, Ye L. A Review of the Application of Machine Learning in Water Quality Evaluation. *Eco-Environment & Health*, June 2022; 1(2): 107-116.
- [5] Sun X, Zhang Y, Shi K, Zhang Y, Li N, Wang W, Huang X, Qin B. Monitoring Water Quality Using Proximal Remote Sensing Technology. *Science of The Total Environment*, 10 January 2022; 80: 149805.
- [6] Terzioğlu S. ,Bahadır Koca S, Didinen B, Yiğit Ö. Sürdürülebilir Su Ürünleri Yetiştiriciliğinde Çevre Dostu Üretim, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 2011; 3(1).
- [7] Canlı A, Kurtuluş İ, Canlı M, Tuna Ö. Dünyada ve Ülkemizde İnsansız Sualtı Araçları (İSAA-AUV & ROV) Tasarım ve Uygulamaları, *GİDP Dergisi*, 2016; 4: 43-75.
- [8] Selamoğlu ÇH, Aytan ÜK. Mikroplastiklerin Deniz Çevresinde Neden Olduğu Etkiler. *Doğanın Sesi*, 2020; (6): 44-56.
- [9] Özünlü C. Su Yönetimi, Dora Yayınevi, 2016; Bursa, 1. Baskı: 70-76.
- [10] Güven KC, Öztürk B. Deniz Kirliliği. *İstanbul, Türkiye, TÜDAV Yayınları No: 21*, 2005.
- [11] Yılmaz S, Yakut M, İnce S, Otçu M, Aygün E. Derinlik ve Yön Kontrol Uygulamaları için Su Altı Aracı Tasarımı, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2015; Part C, 3(1): 343-355.
- [12] Zeydan Ö, Özdoğan N, Taştepe Ş, Demirtaş D. Kozlu Deresinde (Zonguldak) Su Kalitesinin İncelenmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi* 2019; 187-197.
- [13] Yılmaz S, Kılıcı SB. Otonom Sualtı Araçlarında Genel Tasarım İlkeleri, *Journal of the Institute of Science and Technology*, 2021.
- [14] Vasilijevic A, Borovic B, Vukic Z. Underwater Vehicle Localization with Complementary Filter: Performance Analysis in the Shallow Water Environment. *J Intell Robot Syst* 2012; 373-386.
- [15] Manoj M, Dhilip Kumar V, Arif M, Bulai E-R, Bulai P, Geman O. State of the Art Techniques for Water Quality Monitoring Systems for Fish Ponds Using IoT and Underwater Sensors: A Review. *Sensors* 2022; 6: 2088.
- [16] Shuo J, Yonghui Z, Wen R, Kebin M. The Unmanned Autonomous Cruise Ship for Water Quality Monitoring and Sampling. *2017 International Conference on Computer Systems, Electronics and Control (ICCSEC)*, Dalian, China, 2017; 700-703.

- [17] Hamid SA, Rahim AMA, Fadhullah SY, Abdullah S, Muhammad Z, Leh NAM. IoT based Water Quality Monitoring System and Evaluation. 2020 10th IEEE International Conference on Control System. Computing and Engineering (ICCSCE), Penang, Malezya, 2020; 102-106.
- [18] Kai C, Weiwei Z, Lu D. Research on Mobile Water Quality Monitoring System Based on Underwater Bionic Robot Fish Platform, 2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications(AEECA), Dalian, Çin, 2020; 457-461.
- [19] Pokhrel S, Pant A, Gautam R, Kshatri DB. Water Quality Monitoring System Using IoT. Journal of Innovations in Engineering Education 2020; 3(1): 155-164.
- [20] Pasika S, Gandla ST. Smart Water Quality Monitoring System with Cost-Effective Using IoT. Heliyon 2020; 6-7.
- [21] Moparthi NR, Mukesh C, Sagar PV. Water Quality Monitoring System Using IOT, 2018 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB), Chennai, India, 2018; 1-5.
- [22] Madhavireddy V, Koteswarrao B. Smart Water Quality Monitoring System Using IoT Technology. Int. J. Eng. Technol 2018; 7 (4.36): 636-639.
- [23] Sung WT, Isa IGT, Hsiao SJ. Designing Aquaculture Monitoring System Based on Data Fusion through Deep Reinforcement Learning (DRL), Electronics, 2023; 12 (2032).
- [24] Oruç İN, Tilki U, Otonom Sualtı Aracı Yörünge İzleme Kontrol Algoritmalarının Analizleri, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2023; 29(2): 131-145.
- [25] Anonim, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Çevre Sorunları ve Öncelikleri Değerlendirme Raporu, 2019; Yayın no: 43, Ankara.
- [26] Kayhan F. E, Ertuğ N. D. Y. Müsilaj Sorunu ve Karakterizasyonu. Doğanın Sesi Dergisi, Haziran 2022; 5 (9): 4-16.
- [27] Toroğlu E, Toroğlu S, Alaeddinoğlu F. Aksu Çayında (Kahramanmaraş) akarsu kirliliği, Coğrafi Bilimler Dergisi, 2006; 4 (1): 93- 103.
- [28] Hacıoğlu N, Dulger B. Monthly Variation of Some Physico-Chemical and Microbiological Parameters in Biga Stream (Biga, Canakkale, Turkey), African Journal of Biotechnology, 2009; 8(9): 1929-1937.
- [29] Anonim, Ankara Üniversitesi Açık Ders Malzemeleri, Çevre Kirliliği, 1998; Bölüm 5, 111-112.
- [30] Çelikkale MS, Düzgüneş E, Okumuş İ. Fisheries Sector in Turkey: Potential, Current State, Constraints and Recommendations (in Turkish), İstanbul Ticaret Odası, 1999; 414, Lebib A.S., İstanbul.
- [31] Yanık T, Aras NM, Çiltaş AK. Su Kalitesine Giriş Ders Notları, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Su Ürünleri Mühendisliği, 2001; Erzurum.



## Deprem Yıkıntı Atıkları ve Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Atık Betonların Taze Beton Özelliklerini Tahmin Eden Sayısal Model Geliştirilmesi

Muhammed ULUCAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> mulucan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 10/10/2023;

Kabul/Accepted: 14/02/2024)

**Öz:** Bu çalışma deprem yıkıntı atıkları ve uçucu kül kullanılarak üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin edebilmek için sayısal bir model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda farklı çimento dozajı, farklı su/çimento oranı, farklı uçucu kül ikame oranı içeren 24 farklı atık beton serisi üretilmiştir. Üretilen beton serileri üzerinde taze beton özelliklerini belirlemek için slump testleri uygulanmıştır. Elde edilen slump değerleri ve karışım miktarları dikkate alınarak tepki yüzeyi metodu üzerinde istatistik analizler yapılmış, sayısal bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modele ait belirlilik katsayısı 0.97 olup, tahmin sonuçları oldukça iyi düzeydedir. Aynı zamanda ek çimento esaslı malzeme olarak uçucu kül ile çimentonun yer değiştirilerek kullanılması, iri agrega olarak deprem yıkıntı atıklarının kullanılmasının sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından büyük avantajlar sağladığı düşünülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Atık yönetimi, Sürdürülebilir kalkınma, İnşaat ve yıkıntı atıkları, Geri dönüşümlü beton agregaları, Tepki yüzeyi metodu.

### Development of Numerical Model to Predict Fresh Concrete Properties of Waste Concrete Produced Using Earthquake Demolition Wastes and Fly Ash

**Abstract:** This study aims to develop a numerical model to predict the fresh concrete properties of waste concrete produced using earthquake demolition wastes and fly ash with high accuracy. For this purpose, a series of 24 waste concretes with different cement dosages, water-to-cement ratios, and fly ash replacement ratios were produced. Slump tests were performed on the produced concrete series to determine the fresh concrete properties. Considering the obtained slump values and mix quantities, statistical analyses were performed on the response surface method, and a numerical model was developed. The coefficient of determination of the developed model is 0.97, and the prediction results are quite good. At the same time, it is thought that the use of fly ash as a supplementary cementitious material by replacing cement with fly ash and the use of earthquake demolition wastes as coarse aggregate provides great advantages in terms of sustainable development and circular economy.

**Key words:** Waste management, Sustainable development, Construction and demolition waste, Recycled concrete aggregate, Response surface method.

#### 1. Giriş

Depremler, doğal afetler, savaşlar, dünya nüfusundaki hızlı artış vb. nedenlerle atık üretimi giderek artmakta ve önemli bir çevre sorunu haline gelmektedir [1,2]. Özellikle yıkıcı depremlerden sonra birçok bina hasar görmekte ve yıkılmaktadır. Bu binaların bir kısmı deprem sırasında yıkılırken, bir kısmı da depremden sonra kontrollü bir şekilde yıkılmaktadır. Son yıllarda Türkiye’de meydana gelen 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi, 6 Şubat 2023 Pazarcık ve Elbistan merkezli Kahramanmaraş depremleri bunlara büyük örnekler olarak gösterilmektedir. Meydana gelen bu yıkıcı depremlerin noktası olarak ortaya çıkan milyonlarca ton inşaat yıkıntı atıkları (İYA) çözüm bekleyen önemli konular arasında yer almaktadır [3,4].

Ortaya çıkan İYA’ları değerlendirmek ve çevre kirliliğini azaltmak için çeşitli çözüm önerileri sunulmuştur. Ancak çok yüksek miktarlarda olan bu atık malzemeleri değerlendirmek için aktif ve geniş bir kullanım alanına sahip olan bir sektör gerekmektedir. Bu nedenle, İYA’ları değerlendirmek için inşaat sektörü büyük bir alternatif olarak görülmektedir [5–7]. Betonun dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi olması bu atık malzemelerin beton içerisinde değerlendirilmesine büyük olanak sağlamaktadır [8–10]. Ancak yapılan literatür araştırmaları İYA’lardan elde edilen geri dönüşümlü beton agregalarının (GDBA) daha düşük özgül ağırlık ve daha yüksek su emme değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla GDBA kullanımı arttıkça basınç

\* Sorumlu yazar: [mulucan@firat.edu.tr](mailto:mulucan@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7629-6846

dayanımı değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmektedir. Ulucan ve Alyamaç 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremi sonrası yıkılan bir binadan elde edilen GDBA'ları kullanarak detaylı çalışmalar yapmıştır [11]. Shrestha Gorkha Depreminden sonra Nepal'in dağlık bölgelerinde depreme dayanıklı evlerin yeniden inşası için kullanılan beş alçak bina sistemindeki enerji tüketimini ve CO<sub>2</sub> emisyonunu değerlendirmeyi amaçlamıştır [12]. Marinkovic ve arkadaşları yapısal kullanım için birkaç farklı yeşil beton karışımının karşılaştırmalı bir çevresel değerlendirmesini sunmuştur [13]. Wijayasundara ve arkadaşları, yapısal betonda doğal agrega yerine GDBA kullanımının değerlendirilmesi için teknik, finansal, çevresel ve sosyal perspektifleri dikkate alan entegre bir metodoloji sunmuştur [14]. Tüm bu çalışmaların ortak sonucu olarak ince GDBA'ların yüksek su emme değerlerine sahip olduğu ve dayanım değerlerinde önemli azalmalar sağladığı tespit edilmiştir. Ancak iri agrega olarak GDBA kullanımının sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından önemli avantajlar sağlayabileceğini belirtmişlerdir [15–17].

Betonun temel bileşenlerinden biri olan çimento, dünya genelindeki karbon salınımının yaklaşık %7'sinden sorumludur ve önemli çevresel etkilere sahiptir. Bu nedenle, zaman içerisinde araştırmacılar çimentonun çevresel etkilerini azaltmak ve önemli çevresel kazanımlar elde etmek için çeşitli çalışmalarda bulunmuşlardır [10,15,16]. Bu çalışmalar kapsamında ek çimento esaslı malzemeler (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) ile çimentoyu yer değiştirerek kullanmışlardır. Böylece hem çimento kullanımının azaltılması, hem atık malzemelerin değerlendirilmesi hem de önemli çevresel kazanımların elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışma, deprem yıkıntı atıkları ve uçucu kül kullanılarak üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden sayısal bir model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda deprem yıkıntı atıkları ve uçucu kül kullanılarak 24 farklı atık beton serisi üretilmiştir. Ardından tepki yüzeyi metodu üzerinde istatistik analizleri yapılarak sayısal model geliştirilmiştir. Yıkıcı depremler sonrası yeni inşa edilen on binlerce binanın olması ve taze beton özelliklerinin betonun kıvamı, dolayısıyla sertleşmiş beton özellikleri üzerinde büyük önem taşınması, yıkılan on binlerce binadan ortaya çıkan deprem yıkıntı atıklarının değerlendirilmesi gibi nedenlerden dolayı bu çalışmanın sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından büyük önem taşıdığı düşünülmektedir.

## 2. Malzeme ve Metot

### 2.1. Malzemeler

Bu çalışmada son zamanlarda piyasada yaygın olarak kullanılmaya başlanan CEM II/A-M (P-LL) Potland kompoze çimentosu kullanılmıştır. Ek çimento esaslı malzeme olarak kullanılan uçucu kül, Zonguldak çatalağzı termik santralinden temin edilmiştir. Deneysel çalışmada ince agrega olarak Palu kumu kullanılırken, iri agrega olarak yıkılan bir binadan elde edilen GDBA'lar kullanılmıştır. Karışım tasarımları yapılırken agrega granülometrisi %60 iri agrega, %40 ince agrega kullanılarak A32-B32 eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Karışımlarda kimyasal katkı olarak ise su azaltıcı kimyasal katkı CHRYSO Optima 280-SC3 kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan çimento ve uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen fiziksel ve kimyasal özellikler temin edilen fabrikalardan alınarak kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Çimento ve uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler	Çimento	Uçucu Kül
CaO	60.5	4.3
SiO <sub>2</sub>	19.5	54.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.4	7.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.1	23.9
SO <sub>3</sub>	3.0	0.2
Na <sub>2</sub> O	0.6	1.0
K <sub>2</sub> O	0.7	3.5
MgO	2.0	3.2
Cl	0.01	0.05
Çözünmeyen kalıntı	1.0	1.0
Kızdırma kaybı	4.0	1.1
<b>Fiziksel Özellikler</b>		
Yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /g)	4200	2645
Özgül ağırlık	3.09	2.04
Priz başlangıcı (dakika)	140	145
Priz sonu (dakika)	230	195

## 2.2. Karışım tasarımları ve uygulanan testler

Deneysel çalışma, iki farklı su/çimento (S/C), üç farklı çimento dozajı ve dört farklı uçucu kül oranı dikkate alınarak tasarlanmıştır. S/Ç oranı 0.45-0.55 olarak tasarlanmasına rağmen uçucu kül ile hacimce yer değiştirilerek kullanıldığından su/bağlayıcı (S/B) oranı değişiklik göstermektedir. Çimento dozajı 300-350-400 kg/m<sup>3</sup>, uçucu kül oranı olarak ise % (0-10-20-30) dikkate alınmıştır. Uçucu kül ile çimento hacimce yer değiştirilerek kullanılmıştır. Su azaltıcı kimyasal katkı miktarı da çimento ağırlığının farklı yüzdelere kullanılarak belirlenmiştir. Kimyasal katkı miktarı belirlenirken betonun işlenebilirliği dikkate alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Toplamda 24 farklı atık beton serisi üretilmiş olup, taze beton özelliklerini belirlemek için slump testleri uygulanmıştır. Elde edilen slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak tepki yüzeyi metodu (TYM) üzerinde istatistik analizler yapılarak sayısal model geliştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ve miktarları Tablo 2’de verilmiştir. Karışım isimlerinde REF (Referans beton serisini), UK (Uçucu külü), yan tarafında yazan 10-20-30 (Uçucu kül kullanım oranını) ifade etmektedir.

**Tablo 2.** Atık beton serilerine ait karışım miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Karışım İsimleri	Çimento	Su	Uçucu Kül	Su/Bağlayıcı	Doğal Agregası		Kimyasal Katkı
					İnce	GDBA İri	
REF-1	300	135.0	0.0	0.45	782.2	1171.9	3.1
REF-2	350	157.5	0.0	0.45	742.3	1112.1	1.1
REF-3	400	180.0	0.0	0.45	702.3	1052.3	0.4
REF-4	300	165.0	0.0	0.55	751.2	1125.5	1.3
REF-5	350	192.5	0.0	0.55	706.1	1058.0	0.4
REF-6	400	220.0	0.0	0.55	661.1	990.4	0.0
UK10-1	270	135.0	19.8	0.47	782.2	1171.9	3.0
UK10-2	315	157.5	23.1	0.47	742.3	1112.1	1.0
UK10-3	360	180.0	26.4	0.47	702.3	1052.3	0.4
UK10-4	270	165.0	19.8	0.57	751.2	1125.5	1.4
UK10-5	315	192.5	23.1	0.57	706.1	1058.0	0.4
UK10-6	360	220.0	26.4	0.57	661.1	990.4	0.0
UK20-1	240	135.0	39.6	0.48	782.2	1171.9	3.1
UK20-2	280	157.5	46.2	0.48	742.3	1112.1	1.0
UK20-3	320	180.0	52.8	0.48	702.3	1052.3	0.4
UK20-4	240	165.0	39.6	0.59	751.2	1125.5	1.4
UK20-5	280	192.5	46.2	0.59	706.1	1058.0	1.0
UK20-6	320	220.0	52.8	0.59	661.1	990.4	0.0
UK30-1	210	135.0	59.4	0.50	782.2	1171.9	2.8
UK30-2	245	157.5	69.3	0.50	742.3	1112.1	0.9
UK30-3	280	180.0	79.2	0.50	702.3	1052.3	0.4
UK30-4	210	165.0	59.4	0.61	751.2	1125.5	1.1
UK30-5	245	192.5	69.3	0.61	706.1	1058.0	0.8
UK30-6	280	220.0	79.2	0.61	661.1	990.4	0.0

## 2.3. Tepki yüzeyi metodu

TYM, parametreler ve yanıt değerleri arasındaki ilişkiyi incelemek için beton teknolojisinde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır [20,21]. TYM, az sayıda veri seti ile uygun sayısal modeller geliştirmek ve deneysel verileri yüksek doğrulukla tahmin etmek için kullanılmaktadır [22,23]. TYM kullanılarak istatistik analiz yapılırken parametrelerin seçimi oldukça büyük önem taşımakta ve yanıt değerleri üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Bu deneysel çalışmaya ait verilerin istatistik analizleri yapılırken taze beton özelliklerini belirlemek için su/bağlayıcı (S/B), agrega/çimento (A/C), uçucu kül/çimento (UK/C) ve kimyasal katkı/çimento (KK/C) parametreleri dikkate alınmıştır. Bu parametreler, yapılan ANOVA analizi sonrası geliştirilen model üzerinde her bir parametrenin p-değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. Tüm parametrelere ait p-değerleri < 0.05 olduğundan model üzerinde anlamlı ve olumlu etki yarattığı tespit edilmiştir. TYM ile analiz yapılırken değişkenlere ait en düşük değerler -1, en yüksek değerler +1 ve değerlerin aritmetik ortalaması ise 0 olarak belirtilmektedir. İstatistik analiz aşamasında dikkate alınan parametreler ve değişim aralıkları Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 3.** TYM’de dikkate alınan parametreler ve değişim aralıkları

Parametreler	-1	0	1
S/B	0.45	0.53	0.61
A/C	4.27	5.50	6.74
UK/C	0.000	0.099	0.198
KK/C	0.000	0.006	0.013

### 3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın bu bölümü üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden sayısal modelin etkinliğini, sayısal modelde dikkate alınan parametrelerin slump üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır.

#### 3.1. Sayısal modelin geliştirilmesi

Sayısal model geliştirilirken değişken olarak *S/B*, *A/C*, *UK/C* ve *KK/C* parametreleri dikkate alınarak sayısal model tasarlanmıştır. Yanıt değişkeni olarak ise slump değerleri dikkate alınmıştır. Parametreler ve yanıt değerleri kullanılarak TYM üzerinde istatistik analiz yapılmış ve sayısal model geliştirilmiştir. Geliştirilen modele ait denklem (1)’de, TYM’de dikkate alınan parametreler ve yanıt değerleri ise Tablo 4’de verilmiştir.

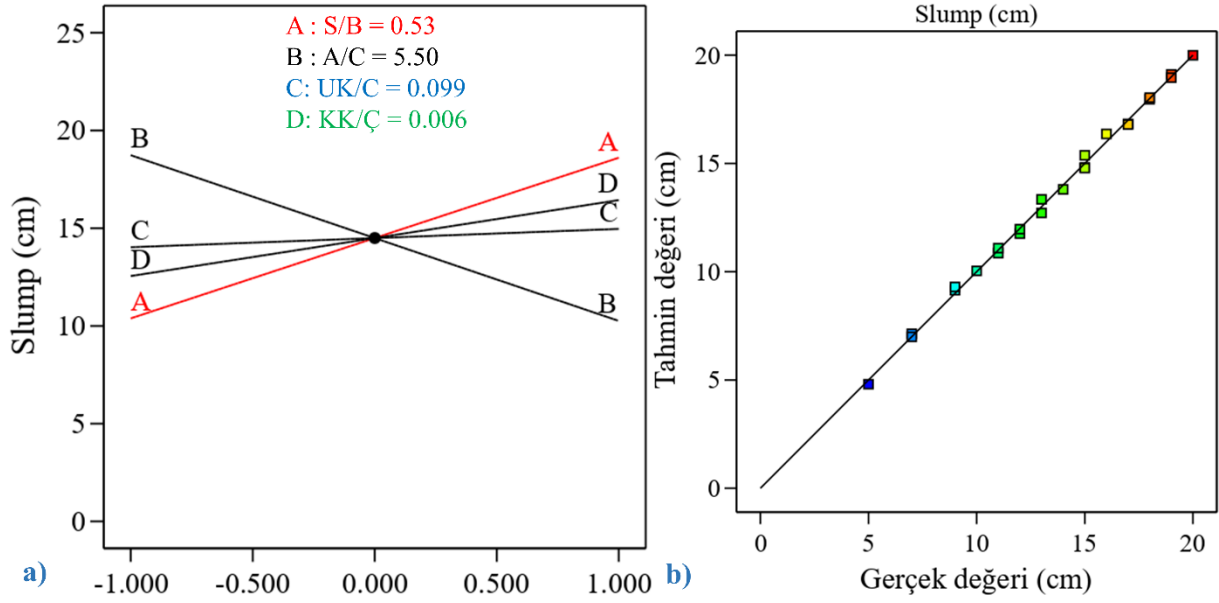
$$\text{Slump (cm)} = - 43.2 * (S/B) - 16.2 * (A/C) + 44.8 * (UK/C) + 3047.4 * (KK/C) + 24.4 * (S/B * A/C) - 52.2 * (S/B * UK/C) - 3215.3 * (S/B * KK/C) - 3.1 * (A/C * UK/C) - 139.0 * (A/C * KK/C) - 1233.9 * (UK/C * KK/C) + 52.5 \quad (1)$$

**Tablo 4.** İstatistik analizde dikkate alınan parametreler ve yanıt değerleri.

Karışım İsimleri	S/B	A/C	UK/C	KK/C	Slump (cm)
REF-1	0.45	6.74	0.000	0.010	5
REF-2	0.45	5.48	0.000	0.003	7
REF-3	0.45	4.54	0.000	0.001	10
REF-4	0.55	6.47	0.000	0.004	12
REF-5	0.55	5.21	0.000	0.001	15
REF-6	0.55	4.27	0.000	0.000	17
UK10-1	0.47	6.74	0.066	0.011	5
UK10-2	0.47	5.48	0.066	0.003	8
UK10-3	0.47	4.54	0.066	0.001	11
UK10-4	0.57	6.47	0.066	0.005	13
UK10-5	0.57	5.21	0.066	0.001	16
UK10-6	0.57	4.27	0.066	0.000	18
UK20-1	0.48	6.74	0.132	0.013	6
UK20-2	0.48	5.48	0.132	0.004	9
UK20-3	0.48	4.54	0.132	0.001	13
UK20-4	0.59	6.47	0.132	0.006	15
UK20-5	0.59	5.21	0.132	0.004	18
UK20-6	0.59	4.27	0.132	0.000	19
UK30-1	0.50	6.74	0.198	0.013	7
UK30-2	0.50	5.48	0.198	0.004	11
UK30-3	0.50	4.54	0.198	0.001	15
UK30-4	0.61	6.47	0.198	0.005	16
UK30-5	0.61	5.21	0.198	0.003	19
UK30-6	0.61	4.27	0.198	0.000	20

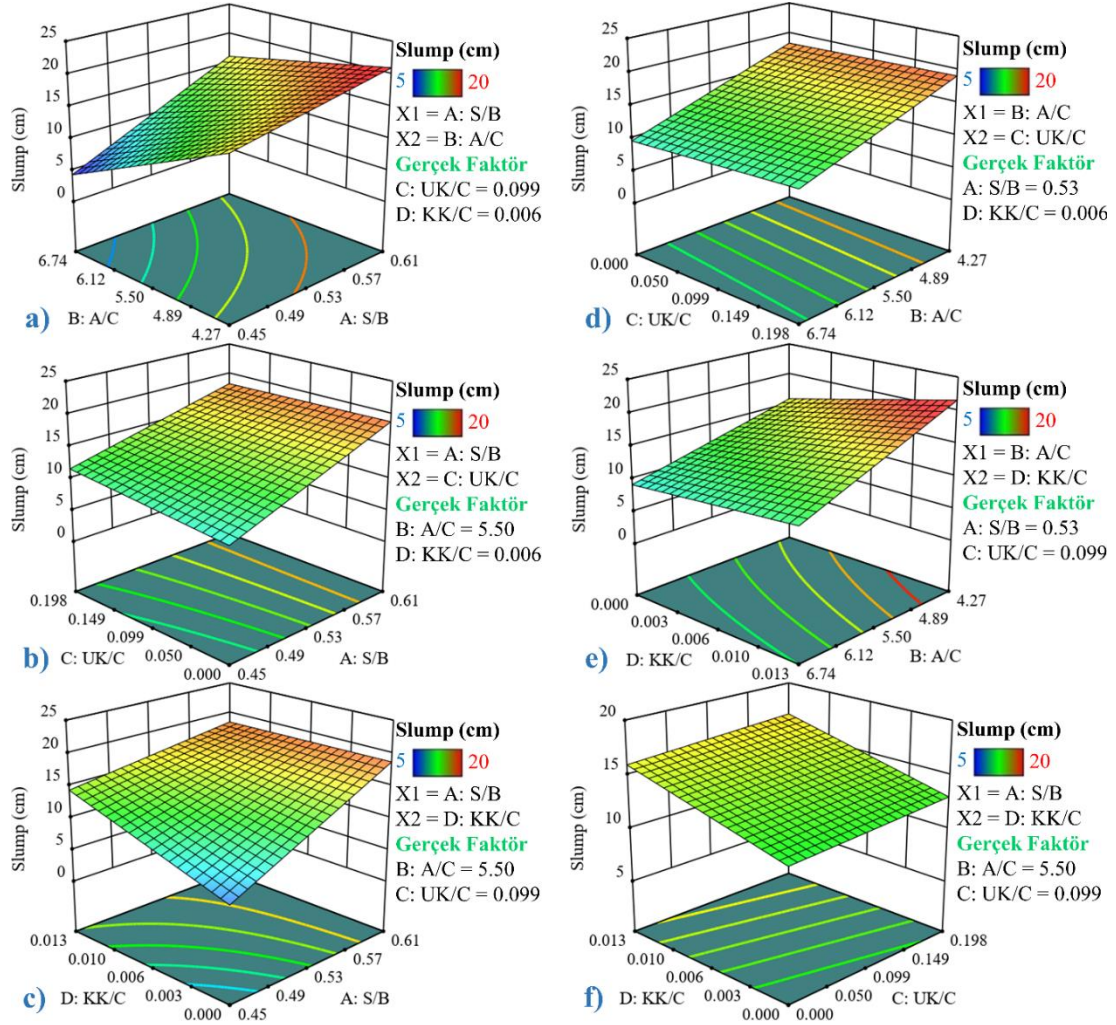
Sayısal modelde dikkate alınan parametrelerin yanıt değerleri üzerindeki etkilerini daha açık bir şekilde göstermek için pertürbasyon eğrileri kullanılmaktadır. Şekil 1.a, sayısal modele ait pertürbasyon eğrisini göstermektedir. Burada, dikkate alınan parametreler  $A = S/B$ ,  $B = A/C$ ,  $C = UK/C$  ve  $D = KK/C$  olarak isimlendirilmiştir. Pertürbasyon eğrisinden *S/B*, *UK/C*, *KK/C* değerleri arttıkça slump değerlerinde bir artış, *A/C* değerleri arttıkça slump değerlerinde bir azalma görülmektedir. Şekil 1.b ise geliştirilen sayısal modele ait tahmin sonuçları ile gerçek sonuçların karşılaştırılmasını göstermektedir. Geliştirilen modele ait belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) = 0.97 olarak hesaplanmış olup, modelin etkinliği görülmüştür.





Şekil 1. Sayısal modele ait pertürbasyon eğrisi ve ilişki grafiği.

Her bir parametrenin yanıt değeri üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemek için elde edilen 3 boyutlu etki grafikleri Şekil 2’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 2’nin detaylı bir şekilde incelenmesi slump değerlerinin 5-20 cm aralığında değiştiğini göstermektedir. Her parametrenin yanıt değeri üzerindeki etkisi ayrı ayrı 3 boyutlu olarak belirtilerek harflendirilmiştir. Burada gerçek faktör olarak verilen değerler 3 boyutlu etki grafiğinde gösterilmeyen ancak modelde yer alan parametreleri göstermektedir. Örneğin Şekil 2.a’da  $UK/C$  ve  $KK/C$  model içerisinde yer almakta ama üç boyutlu etki grafiğinde  $S/B$  ve  $A/C$ ’in yanıt değeri üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Şekil 2.a’dan  $S/B$  değerleri arttıkça slump değerlerinde önemli bir artışın olduğu açıkça görülürken  $A/C$  değerleri arttıkça slump değerlerinde önemli azalmalar meydana gelmiştir. Şekil 2.b,  $S/B$  ve  $UK/C$ ’in slump üzerindeki etkisini göstermektedir. Parametrelere ait değerler arttıkça slump değerlerinde de artış görülmektedir. Kimyasal katkı kullanımının slump üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla Şekil 2.e yorumlanacak olursa  $KK/C$  değerleri arttıkça slump değerleri önemli ölçüde artmaktadır. 3 boyutlu etki grafiklerinin genel bir değerlendirmesi  $S/B$ ,  $UK/C$  ve  $KK/C$  değerleri arttıkça slump değerlerinin arttığını,  $A/C$  değerleri arttıkça slump değerlerinin azaldığını ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Geliştirilen sayısal modele ait 3 boyutlu etki grafikleri.

#### 4. Sonuçlar

Betonun kalitesi taze ve sertleşmiş beton özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Taze beton özellikleri betonun basınç dayanımı üzerinde dolaylı yoldan büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada atık malzemeler kullanılarak üretilen atık betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden sayısal model geliştirilmiş olup elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Geliştirilen sayısal modele ait belirlilik katsayısı 0.97 olarak hesaplanmıştır. Böylece geliştirilen modele ait tahmin sonuçlarının oldukça yüksek doğruluklu olduğu görülmektedir. Sayısal model yardımıyla üretilen atık betonların taze beton özellikleri kolay ve pratik bir şekilde belirlenebilmektedir.
- Bu çalışma ile atık malzemelerin yeniden kullanımı, azaltılması ve geri dönüşümünün sağlanmasına olanak sağlanmıştır. Son yıllarda meydana gelen yıkıcı depremler, ortaya çıkan atık miktarları dikkate alındığında bu atık malzemelerin kullanılmasının sürdürülebilir kalkınma ve döngüsel ekonomi açısından büyük önem taşıdığı görülmüştür.
- Ek çimento esaslı malzeme olarak uçucu kül kullanımının artmasıyla birlikte slump değerlerinde bir artış görülmekte ve aynı zamanda çimento kullanımının azaltılmasıyla önemli çevresel kazanımların olduğu düşünülmektedir.

**Kaynaklar**

- [1] T. Ding, J. Xiao, Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai, *Waste Manag.* 34 (2014) 2327–2334. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.029>.
- [2] M. Mália, J. de Brito, M.D. Pinheiro, M. Bravo, Construction and demolition waste indicators, *Waste Manag. Res.* 31 (2013) 241–255. <https://doi.org/10.1177/0734242X12471707>.
- [3] M. Ulucan, K.E. Alyamaç, Geri Dönüşüm Agregalı Betonların Erken Yaş Dayanımlarını Tahmin Eden Matematiksel Modellerin Geliştirilmesi, *J. Inst. Sci. Technol.* 13 (2023) 399–405. <https://doi.org/10.21597/jist.1174470>.
- [4] M. Ulucan, K.E. Alyamaç, Farklı Oranlarda Geri Dönüşümlü Beton Agregaları Kullanılarak Üretilen Betonların Çevresel Etki Değerlendirmelerinin Yapılması, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilim. Derg.* 23 (2023) 438–447. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1133802>.
- [5] W. Xing, V.W.Y. Tam, K.N. Le, J.L. Hao, J. Wang, Life cycle assessment of sustainable concrete with recycled aggregate and supplementary cementitious materials, *Resour. Conserv. Recycl.* 193 (2023) 106947. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106947>.
- [6] M. Shmls, M.A. Abed, T. Horvath, D. Bozsaky, Sustainability framework of recycled aggregate concrete produced with supplementary cementitious materials, *Ain Shams Eng. J.* 14 (2023) 102036. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102036>.
- [7] M. Ulucan, G. Yildirim, B. Alatas, K.E. Alyamac, A new intelligent sunflower optimization based explainable artificial intelligence approach for early-age concrete compressive strength classification and mixture design of RAC, *Struct. Concr.* (2023). <https://doi.org/10.1002/suco.202300138>.
- [8] K.A. Knight, P.R. Cunningham, S.A. Miller, Optimizing supplementary cementitious material replacement to minimize the environmental impacts of concrete, *Cem. Concr. Compos.* 139 (2023) 105049. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105049>.
- [9] M. Ulucan, Y. Tas, K.E. Alyamac, Multi-objective optimization and assessment of recycled concrete aggregates for sustainable development: Example of the Kömürhan bridge, *Struct. Concr.* (2023). <https://doi.org/10.1002/suco.202201018>.
- [10] B. Bennett, P. Visintin, T. Xie, Global warming potential of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials, *J. Build. Eng.* 52 (2022) 104394. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104394>.
- [11] M. Ulucan, K.E. Alyamac, A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental, *Waste Manag.* 146 (2022) 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.045>.
- [12] J.K. Shrestha, Assessment of energy demand and greenhouse gas emissions in low rise building systems: Case study of five building systems built after the Gorkha Earthquake in Nepal, *J. Build. Eng.* 34 (2021) 101831. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101831>.
- [13] S. Marinković, J. Dragaš, I. Ignjatović, N. Tošić, Environmental assessment of green concretes for structural use, *J. Clean. Prod.* 154 (2017) 633–649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015>.
- [14] M. Wijayasundara, P. Mendis, R.H. Crawford, Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete, *J. Clean. Prod.* 166 (2017) 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.001>.
- [15] M. Ulucan, K.E. Alyamac, An integrative approach of the use of recycled concrete aggregate in high-rise buildings: example of the Elysium, *Struct. Concr.* 24 (2023) 3329–3350. <https://doi.org/10.1002/suco.202200512>.
- [16] X. Sun, Y. Liu, Y. Li, S. Chai, H. Zhang, Y. Liu, G. Zhao, J. Li, T. Xu, Y. Wei, Environmental sustainability analysis of dairy bedding regeneration system based on energy evaluation and life cycle assessment methods, *Environ. Sci. Pollut. Res.* (2022) 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23525-4>.
- [17] G. Kumar, R.C. Gupta, S. Shrivastava, Sustainable Zero-Slump Concrete Containing Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste of a 63-Year-Old Demolished Building, *J. Mater. Civ. Eng.* 34 (2022) 4022115.
- [18] M. Ulucan, K.E. Alyamac, A comprehensive assessment of mechanical and environmental properties of green concretes produced using recycled concrete aggregates and supplementary cementitious material, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30 (2023) 97765–97785. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29197-y>.
- [19] F. Farmani, P. Khadiv-Parsi, A.A. Ramezani-pour, B. Bonakdarpour, F. Yazdian, Dual eco-friendly application of silica fume and scoria in cement-based materials through the enhancement of microbially-induced carbonate precipitation, *Case Stud. Constr. Mater.* (2022) e01481.
- [20] T. Demir, M. Ulucan, K.E. Alyamaç, Development of Combined Methods Using Non-Destructive Test Methods to Determine the In-Place Strength of High-Strength Concretes, *Processes.* 11 (2023) 673. <https://doi.org/10.3390/pr11030673>.
- [21] B. Demirel, E. Gultekin, K.E. Alyamac, Performance of structural lightweight concrete containing metakaolin after elevated temperature, *KSCE J. Civ. Eng.* 23 (2019) 2997–3004. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1192-x>.
- [22] K.E. Alyamac, E. Ghafari, R. Ince, Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method, *J. Clean. Prod.* 144 (2017) 192–202.
- [23] A. Habibi, A.M. Ramezani-pour, M. Mahdikhani, RSM-based optimized mix design of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials based on waste generation and global warming potential, *Resour. Conserv. Recycl.* 167 (2021) 105420. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105420>.



## Zemine Entegre Piezoelektrik Sensörden Enerji Hasadı

**Birol ÇAVUŞ<sup>1\*</sup>, Sibel AKKAYA OY<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Yenilenebilir Enerji, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye

<sup>2</sup> Deniz Teknolojisi Anabilim Dalı Deniz Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği Bölümü, Fatsa Deniz Bilimleri Fakültesi, Ordu Üniversitesi, Ordu, Türkiye

\*<sup>1</sup> b\_cavus@hotmail.com, <sup>2</sup> sibelakkaya@odu.edu.tr

(Geliş/Received: 07/04/2023;

Kabul/Accepted:26/10/2023)

**Öz:** Bu çalışma insan hareketliliğinin fazla olduğu yerlerde, düşük güçlü uygulamalar için zemine yerleştirilen piezoelektrik seramik dönüştürücülere dayalı deneysel bir enerji hasat sistemini tanıtmaktadır. Yalnızca bir PZT'nin üretebildiği gerilim tek başına bir sisteme enerji verebilecek seviyede değildir. Bu yüzden PZT'ler hasat edilen gücü en üst seviyeye çıkarabilecek uygun devre topolojisiyle seri ve paralel bağlanarak elde edilecek toplam güç artırılmıştır. Deneysel çalışmada 20 × 30 cm'lik ahşap bir zeminin her bir kısa kenarına 5 adet PZT yerleştirilmiş, toplamda 10 adet PZT'den 10 adet gerilim ikileyici ile enerji hasadı yapılmıştır. Dört farklı ağırlıkta birey üç farklı yürüme hızında bir dakika boyunca deney düzeneğine basmış ve tüm sonuçlar grafiksel olarak elde edilmiştir. Yük olarak 220 KΩ direnç kullanılmıştır. Deney düzeneği 48 kg ağırlığındaki bireyle test edildiğinde maksimum 23,42 µW (2,27 volt), 58 kg ağırlığında 13,13 µW (1,70 volt), 71 kg ağırlığında 59,56 µW (3,62 volt), 85 kg ağırlığında 55,68 µW (3,50 volt) gerilim hasat edilmiştir. Deneysel sonuçlar aynı bireyin yürüme hızı arttıkça elde edilecek ortalama gerilimin yükseldiğini, ayrıca aynı yürüme hızlarındaki bireylerden ağır olanın daha fazla enerji hasat edilmesini sağladığını göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Piezo, zemin, enerji hasadı, gerilim ikileyici

### Energy Harvesting From Floor Integrated Piezoelectric Sensor

**Abstract:** This study introduces an experimental energy harvesting system based on ground-mounted piezoelectric ceramic transducers for low-power applications where human mobility is high. The voltage that only a PZT can produce is not at a level that can energize a system alone. Therefore, the total power to be obtained has been increased by connecting PZTs in series and parallel with the appropriate circuit topology that can maximize the harvested power. In the experimental study, 5 PZTs were placed on each short side of a 20 × 30 cm wooden floor, and energy was harvested from 10 PZTs in total with 10 voltage doublers. Individuals of four different weights stepped on the experimental setup for one minute at three different walking speeds and all results were obtained graphically. A 220 KΩ resistor is used as load. When the experimental setup was tested with an individual weighing 48 kg, a maximum power 23.42 µW (2.27 volts), 13.13 µW (1.70 volts) for 58 kg, 59.56 µW (3.62 volts) for 71 kg and 55.68 µW (3.50 volts) for 85 kg was harvested. Experimental results have shown that as the walking speed of the same individual increases, the average tension to be obtained increases, and the heavier individuals at the same walking speeds provide more energy harvest.

**Keywords:** Piezo, floor, energy harvesting, voltage doubler

### 1. Giriş

Günümüzde artan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için gelişen sanayi ve teknoloji, enerjiye olan talebi de arttırmıştır. Fosil enerji kaynaklarının tükeniyor olması ve çevre açısından olumsuzlukları insanları alternatif enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Isı, ışık, titreşim doğada kendinden var olan enerji tipleridir. Özellikle titreşim enerjisi insan ve çevre hareketlilikleri ile doğal olarak oluşabilir. Kullanılmadığında yok olan bu enerji, geliştirilen çeşitli enerji hasatlama sistemleri ve bu sistemlerden maksimum seviyede verim alabilmek için yapılan elektronik devrelerle elektrik enerjisine çevrilebilirler.

Zhang ve arkadaşları [1] piezoelektrik enerji hasadının, titreşimli ortamlarda düşük güç tüketen cihazlar için ideal bir güç kaynağı olarak kabul edildiğini, elektronik teknolojisinin, mikro işleme teknolojisinin ve arayüz devrelerinin sürekli gelişmesiyle, PEH'in yakın gelecekte pratik uygulamalara gireceğine inanıldığını ve belirli alanlarda geleneksel enerji kaynağının yerini gelecekte beklenildiğini belirtmişlerdir. Titreşimden ve/veya uygulanan basınçtan elektrik enerjisi üreten piezoelektrik malzemelerle ilgili giderek daha fazla çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Oy [2] kütle-yay yapısı rüzgâr etkisiyle titreşen 15cm'lik 20 adet diyafram tipi PZT'li, 12m/s nominal rüzgâr hızında sunulan deneysel jeneratörün maksimum çıkış gücünü 10.8mJ olarak

\* Sorumlu yazar: [b\\_cavus@hotmail.com](mailto:b_cavus@hotmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0009-6418-3217, <sup>2</sup> 0000-0002-1209-920X

ölçmüş, daha fazla PZT kullanarak jeneratörün çıkış gücünü arttırabileceğini ifade etmiştir. Özellikle gelişen teknolojiye bağlı olarak üretilen elektronik sistemlerin güç gereksinimlerinin düşüklüğü yani düşük güçlerde çalışabilmesi, piezoelektrik malzemelerden hasat edilen enerjinin düşük olmasına rağmen kullanılabilir olmasını sağlamıştır. Ayrıca hasat edilen enerjinin depolanması ve ihtiyaç anında kullanılabilir olması da piezoelektrik enerji hasadına ilgiyi arttırmıştır. Li ve arkadaşları [3] karayoluna yerleştirilen ve üzerinden araç geçen piezoelektrik cihazın, gerçek bir lastik yükü altında 190 V'luk bir açık devre voltajı ile yeni piezoelektrik özelliklere sahip olduğunu ve trafik parametrelerinin voltaj dalga biçiminden çıkarılabileceğini doğrulamıştır. Cho ve arkadaşları [4] gerçek karayolu üzerine kurulu yola uyumlu bir piezoelektrik enerji toplayıcıyı üzerinde çalışmışlardır. 30 km/saat araç hızında maksimum 196 V voltaj ve 2080 mW (20,79 W/m<sup>2</sup>) çıkış gücü elde etmişlerdir. Jeon ve arkadaşları [5] önerdikleri piezoelektrik enerji hasat mekanizmasıyla 1 mm'lik bir giriş yer değiştirmesi altında 50 kΩ'luk bir yük direncinde 60,3 mW'luk bir maksimum çıkış gücü elde etmişlerdir. Sonuçların, önerilen piezoelektrik enerji hasat mekanizması tarafından üretilen enerjinin akıllı yollarda elektrikli araçlar için potansiyel olarak bir güç kaynağı olarak kullanılabilirliğini kanıtlandığını belirtmişlerdir. Shenck ve Paradiso [6] 2001 yılındaki bir makalelerinde, elektrik kablolu sorununu ortadan kaldıran yeni bir yaklaşımın ortaya çıktığını, insan faaliyetlerinden kaynaklanan atık enerjiyi kullanarak cihazların kendisine elektrik enerjisi sağlayabildiğini ve depolayabildiğini yazmışlardır. Nimachwala ve Pandya [7] piezo hücreleri bir çift ayakkabıya yerleştirerek enerji hasadı ve bu enerjiyi power banka depolamayla ilgili bir çalışma yapmıştır. Wang ve arkadaşları [8] geliştirdikleri PEH ile bir insan yürürken 24Vp-p ve koşarken 55Vp-p voltaj, paralel bağlı PZT modüllere sahip PEH ile 9,2 Hz frekansında ortalama 29 µW güç ürettiklerini belirtmişlerdir. Kuang ve arkadaşları [9] insan yürüyüşünden hasat ettikleri enerji ile her aktif zamanda WSN (wireless sensor node) sensörlerden 10 ms aralıklarla 482 okuma örneği alabilmis ve tüm verileri 4 m mesafedeki bir baz istasyonuna iletebilmişlerdir. Frontoni ve arkadaşları [10] bir ayakkabının içine yerleştirilebilen ve yürürken elektrik enerjisi üretmek için kullanılabilen farklı cihazları incelemişlerdir. Ana amacı taşıyıcı yürürken periyodik olarak dijital bir RFID yayınlayan ayakkabılara gömülü bir iç mekân lokalizasyon sisteminin geliştirilmesi olan çalışmanın sonuçlarını cesaret verici olarak değerlendirmişlerdir. Starner [11] insanın yürümesinin önemli bir enerji hasadı kaynağı olduğunu, hızlı bir tempoda yürüyen ortalama (68 kg) bir kişinin (ayak dikey olarak 5 cm hareket ederken saniyede iki adım) topuk hareketinde 67 watt gücün mevcut olduğunu tahmin etmiştir. Rocha ve arkadaşları [12] yürüyen insanlardan enerji toplamak için piezoelektrik polimerlerin kullanımını ve enerjiyi üretip biriktirebilen bir ayakkabının imalatını anlattıkları bir makale yayımlamışlardır. Basit konfigürasyon ve elektronik sayesinde enerji hasadının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Elektronik cihazların işleyişine uygun enerji değerleri elde etmek ve elektromekanik dönüşümü iyileştirmek için malzemede iyileştirmeler yapmak gerektiğini yazmışlardır. Enerji transferini optimize etmek için enerji hasatının ve piezoelektrik jeneratörlerin geometrisinin ve sayısının kesin olarak belirlenmesi gerektiği sonucuna varmışlardır. Iswanto ve arkadaşları [13] adımdan piezoelektrik enerji hasadı ile ilgili yaptıkları çalışmada, elde ettikleri verilerin tartışmasına ve analizine dayanarak, piezoelektrik tarafından üretilen akım ve voltajın verilen kuvvetin büyüklüğü ile orantılı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Elde edilen en yüksek akım 938 mikroamper, en düşük akım 641 mikroamperdir. Elde edilen en yüksek voltaj 80 volt, en düşük voltaj ise 67 voltur. Elde edilen enerji ile pil şarjı üzerine de araştırma yapmışlardır. Buna göre piezoelektrik zemine basma sıklığının pil şarjını etkilediğini belirtmişlerdir. Frekans ne kadar yüksek olursa, akımın o kadar kararlı olduğu ve pilin o kadar hızlı şarj olduğu sonucuna varmışlardır. Boutalbat ve arkadaşları [14] poliviniliden florür filminden oluşan akıllı bir yapının yürüme sırasında ayak tarafından üretilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için ayakkabı içindeki uygulamasını değerlendirdikleri bir çalışma yapmışlardır. 200 N sıkıştırma kuvveti altında poliviniliden florür filmin maksimum hasat gücünün 5,37 µW olduğu bulmuşlardır. Lim ve arkadaşları [15] insanların piezoelektrik transduser yerleştirilen karolar üzerinde yürüdüklerinde enerji üreten bir prototip yapmışlardır. Düşük voltajlı elektronik cihazlarda uygulamaların mevcut olduğunu ve piezoelektrik malzemelerin sayısının ve bağlantısının çıkış voltajını etkileyeceğini belirtmişlerdir. Kymissis ve arkadaşları [16] bir ayakkabının içine yerleştirilebilen ve yürürken "parazitik" elektrik gücü üretmek için kullanılabilen üç farklı cihazı incelemişlerdir. Hem PVDF hem de PZT, standart bir koşu spor ayakkabısına kolayca entegre edilmiş ve kendi kendine güç sağlayan RFID etiketi, faydalı işlemlere güç sağlamak için birkaç adımda yeterli enerji toplayabilmiştir. Apriyanto ve arkadaşları [17] IoT uygulamaları için bir PEH modül önermiş ve yaptıkları çalışmada her adım için 7,436 µJ, 40 kez 45 kg yük basıncıyla 297,4 µJ toplam enerji üreterek basit bir enerji toplama sistemi ile IoT uygulamasındaki WSN düğümlerini besleyebilmişlerdir. Qian ve arkadaşları [18] iki aşamalı bir amplifikasyon mekanizması kullanarak insan yürüyüşünden piezoelektrik enerji elde etmiştir. Yaptıkları sayısal simülasyonlar, vücut ağırlığı 84 kg ve boyu 172 cm olan bir erkek denekten 12,8 mW ortalama güç çıkışı ve 204,7 mW tepe güç çıkışının 3,5 mph (5,6 km/s) yürüme hızında elde edilebileceğini göstermişlerdir. Deng ve arkadaşları [19] insan adımı mekanik enerjisini toplayan basınç tipi bir jeneratör önermişler, bir prototip tasarlamış ve üretmişlerdir. Önerilen basınç tipi jeneratör, basınca maruz kaldığında 82,8 cm<sup>3</sup>'lük bir hacme sahipti. Ortalama çıkış gücü, 4 km/s'lik yürüme

hızının altındayken 97 mW'a ulaşabildi. Sonuç olarak, elektromanyetik güçle çalışan çoğu cihazdan daha yüksek olan  $1,17 \text{ mW/cm}^3$  güç yoğunluğunu elde edebilmişlerdir. Zhong ve arkadaşları [20] çok katmanlı piezoelektrik bir yapı ile piezoelektrik enerji hasat zemini tasarımı yapmışlardır. Tasarlanan piezoelektrik enerji hasat zemin yapısı, yürüyen bir insanın zeminde adım atma etkisini adım frekansı gibi farklı parametrelerle simüle edebilen bir adım makinesi tarafından test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, kirişlerin paralel bağlı olduğu bir grup dört katmanlı prototipin maksimum çıkış gücünün 4 mm'lik bir vuruşta ve 0,83 Hz'lik bir adım frekansında  $960,9 \mu\text{W}$  olduğunu göstermiştir. Song ve arkadaşları [21] gerçek bir yürüyüş yoluna kurulabilen bir kaldırım taşı piezoelektrik enerji toplayıcı önermişlerdir. Yürüme yolu sinyal göstergesine (sınırlayıcı) güç verebilen ve ayrıca pil olmadan yürüme yolunun yakınında çevresel verileri (nem ve sıcaklık gibi) toplayabilen bir Nesnelerin İnterneti (IoT) sistemi geliştirmişlerdir. Gerçekçi koşullara uygulanan enerji depolama testi, yani 60 kg'lık bir kişi (ortalama ağırlık koşulu) modülün üzerinden 10 kez geçtiğinde bir kapasitörü ( $1000 \mu\text{F}$ )  $55,6 \text{ mJ}$ 'ye şarj etti. Sonuç olarak gerçek bir geçit üzerine kurulu bir sınırlayıcıyı başarıyla açmış ve harici bir enerji kaynağı olmadan IoT sensör sistemine güç vermiştir. Wang ve arkadaşları [22] insan hareketinden doğrusal olmayan piezoelektrik enerji hasadının optimum direnç analizi ve deneysel olarak doğrulamasının yapılmasını amaçladıkları çalışmalarında 65 kg ağırlık ve 167 cm bir denekle  $7 \text{ km/s}$ 'lik çalışma hızında  $30,55 \text{ mW}$ 'lık maksimum güç elde etmişlerdir. Türkmen ve Çelik [23] piezoelektrik malzeme entegre ettikleri ayakkabıdan enerji hasadı yaptıkları çalışmalarında 90 kg ağırlığında yürüyen bir insanın  $1,43 \text{ mV}$  güç üretebileceğini göstermişlerdir.

Bu çalışmada insan hareketliliğinin fazla olduğu yerlerde, düşük güçlü uygulamalar için zemine yerleştirilen piezoelektrik seramik dönüştürücülere dayalı deneysel bir enerji toplama sistemi önerilmiştir. Toplam 10 adet PZT kullanılmış, dört farklı ağırlıkta birey üç farklı yürüme hızında bir dakika boyunca deney düzeneğine basmıştır. Birçok çalışmada kullanılan, her alternansta iki adet ileri voltaj düşümü yüksek diyotun devrede olduğu tam dalga doğrulama yönteminin aksine her alternansta ileri voltaj düşümü küçük bir adet diyotun devrede olduğu gerilim ikileyicilerle enerji hasadı yapılmıştır. Böylece diyotlardan kaynaklanan gerilim kaybı azaltılmıştır. Çalışma, literatürde tek bir bireyin yürümesinden enerji hasadı ile ilgili yapılan araştırmalardan farklı olarak dört farklı bireyle PZT'ye uygulanan ağırlıkların değişkenliklerinin test edilmesi ve insanın normal yürüme temposu civarında üç farklı yürüme hızında enerji hasadına ait sonuçlar vermesi açısından özgün ve yapılacak diğer araştırmalara örnek olacak niteliktedir.

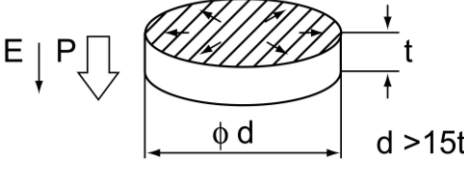
## 2. Tasarım

### 2.1. Piezoelektrik etki ve sensörler

“Piezoelektrik seramikler, piezoelektrik ve ters piezoelektrik etki olarak bilinirler. Piezoelektrik etki, mekanik titreşime maruz kaldığında bir kristalin elektrik üretmesidir. Ters piezoelektrik etki, kristalin bir elektrik alanı içindeyken mekanik titreşim üretmesidir. Piezoelektrik malzemelerden Rochelle tuzu ve kuvars uzun zamandır tek-kristal piezoelektrik madde olarak bilinmesine rağmen esas olarak nispeten Rochelle tuzunun zayıf kristal stabilitesi ve kuvarsın sınırlı serbestlik derecesiyle sınırlı bir uygulama aralığına sahip olmuşlardır. Daha sonra, bir piezoelektrik seramik olan baryum titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) ultrasonik uygulamalar için tanıtılmış, daha yakın zamanlarda, elektromekanik dönüştürme verimliliği ve kararlılığına sahip, kurşun titanat, kurşun zirkonat sistemi ( $\text{PbTiO}_3$  .  $\text{PbZrO}_3$ ) ortaya çıkmıştır. Bu durum piezoelektrik seramiklerin uygulama alanını önemli ölçüde genişletmiştir. Belirli bir şekle sahip bir piezoelektrik seramiğe (piezoelektrik dönüştürücü) değişen frekansta bir AC voltajı uygulanırsa, seramiğin çok güçlü bir titreşim ürettiği belirli bir frekans olduğu görülebilir. Bu frekansa rezonans frekansı  $f_r$  denir ve malzemenin şeklinin bir fonksiyonu olan seramiğin spesifik elastik titreşim (rezonans) frekansına bağlıdır. Tablo 1'de gösterildiği gibi radyal modlu piezoelektrik malzeme sabiti sembolleri anlamları şu şekildedir. N: Frekans sabiti, d: Piezoelektrik distorsiyon sabiti, g: Voltaj çıkış sabiti, k: Elektromekanik kuplaj katsayısı,  $Y^E$ : Esneklik sabitinin tersi,  $\epsilon^T$ : Dielektrik sabiti olmak üzere;

Bir piezoelektrik malzeme T stresine maruz kaldığında,  $P = dT$ 'nin (d : piezoelektrik gerinim sabiti) lineer bir fonksiyonu olan polarizasyon P üretir. Bu etkiye normal piezoelektrik etki denir. Tersine, bir piezoelektrik madde elektrotları boyunca uygulanan bir E elektrik alanına sahip olduğunda, elektrik alanın lineer bir fonksiyonu olan bozulma S üretir ve  $S = dE$ 'dir. Bu etkiye ters piezoelektrik etki denir. Elastik bir malzeme için S ile T arasındaki ilişki  $S = s^E T$  'dir. Burada  $s^E$  sebep olan kuvvetin bir fonksiyonu olarak ifade edilen elastik cisim gerinimidir. Dielektrik bir madde için, elektriksel yer değiştirme D ile elektrik alan şiddeti E arasındaki ilişki  $D = \epsilon E$  ile verilir. Bir piezoelektrik seramik için bu ilişkiler, her ikisi de piezoelektrik gerinim sabitleriyle ilişkili olan aşağıdaki denklemlerle verilir:

**Tablo 1.** Radyal modlu piezoelektrik malzeme sabiti sembolleri [24]

Titreşim Modu	Biçim/Titreşim Modu	Rezonans Frekansı (fr)	Malzeme Sabiti Sembolü					
			k	d	g	$Y^E$	$\varepsilon^T$	N
Radyal Mod	 <p>P: Polarizasyon Yönü E: Elektrik Alan Yönü Radyal titreşim modlu ince disk. Polarizasyon disk kalınlığı boyunca yönlendirilir.</p>	$\frac{Np}{d}$	kp	$d_{31}$	$g_{31}$	$Y_{11}^E$	$\varepsilon_{33}^T$	Np

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_n = d_{nj} T_j + \varepsilon_{nm}^T E_m \quad (2)$$

$(m, n = 1, 2, 3; i, j = 1, 2, \dots, 6)$

Denklemlere temel piezoelektrik denklemler (d tipi) denir, burada elektrik alan E ve elektriksel yer değiştirme D vektör büyüklüklerinde temsil edilir; oysa gerilme T ve bozulma S simetrik gerilme büyüklüklerinde verilmiştir. Kristallerin simetrisi dikkate alındığında denklem basitleştirilmiştir. Çünkü denklemlerdeki bazı sabitler sıfırlanır ve diğer bazı sabitler üçüncü bir sabitler grubuna eşit olur. Piezoelektrik seramiklerde, polarizasyon eksen z (3) eksen ve iki gelişigüzel ortogonal eksen (bunlar da z eksenine diktir ve x (1) ve y (2) eksen olduğu varsayılır) boyunca yerleştirildiğinde, kristal seramiğin yapısı 6 mm kristallerinkiyle aynı şekilde temsil edilebilir, bu durumda tek bağımsız sıfır olmayan katsayılar aşağıdaki on sabittir:

$$s_{11}^E \left( \frac{1}{Y_{11}^E} \right), s_{12}^E \left( \frac{1}{Y_{12}^E} \right), s_{13}^E \left( \frac{1}{Y_{13}^E} \right), s_{33}^E \left( \frac{1}{Y_{33}^E} \right), s_{44}^E \left( \frac{1}{Y_{44}^E} \right), \quad (3)$$

$$d_{31}, d_{33}, d_{15}, \varepsilon_{11}^T, \varepsilon_{33}^T$$

Örneğin, dikdörtgen bir seramik şeridin uzunlamasına titreşimi için temel piezoelektrik denklemler aşağıdaki denklemlerle verilir:

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \quad (4)$$

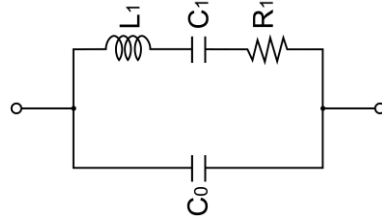
$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (5)$$

Bir piezoelektrik seramik dönüştürücü, titreşim modunu temsil eden temel piezoelektrik denklemlerinden türetilen bir eşdeğer devre ile temsil edilebilir. Devre, Maison'un eşdeğer devresi olarak adlandırılır. Daha genel olarak, Şekil 1'de gösterilen eşdeğer devre, bir piezoelektrik seramiği temsil etmek için kullanılabilir. Bu eşdeğer devrede, seri rezonans frekansı  $f_s$  ve paralel rezonans frekansı  $f_p$  aşağıdaki denklemlerle verilir. Elektromekanik kuplaj katsayısı k'yi belirlemek için sabitler  $f_s$  ve  $f_p$  gereklidir.

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (6)$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}} \quad (7)$$

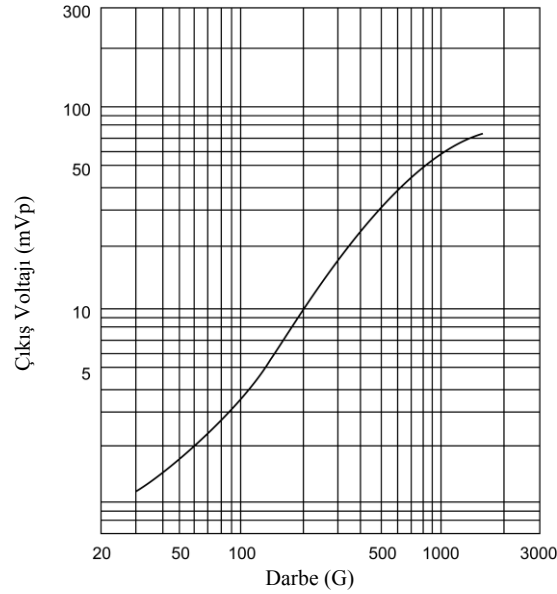




- $L_1$  : Seri İndüktans  
 $C_1$  : Seri Kapasitans  
 $R_1$  : Seri Direnç  
 $C_0$  : Paralel Kapasitans  
 $C_f$  : Serbest Kapasitans =  $C_1 + C_2$

**Şekil 1.** Piezoelektrik Seramik Dönüştürücü için Eşdeğer Devre [24]

Makaleye konu olan piezoelektrik seramik dönüştürücü, maruz kaldığı bir darbenin veya titreşimin ivmesiyle orantılı bir voltaj üretir. Şok sensörü çarpma enerjisini orantılı bir elektrik sinyaline dönüştürmek için piezoelektrik seramik kullanır. Piezoelektrik şok sensörü, metal bir diske lamine edilmiş bir piezoelektrik seramik diskten oluşan "tek biçimli" bir diyafram kullanır. Çıkış gerilimi ve darbe tepkisi Şekil 2'de gösterildiği gibidir. Darbe dalgası 1/2 sinüs dalgası iken çıkış voltajı, çarpmanın ivmesiyle neredeyse orantılıdır.”[24]

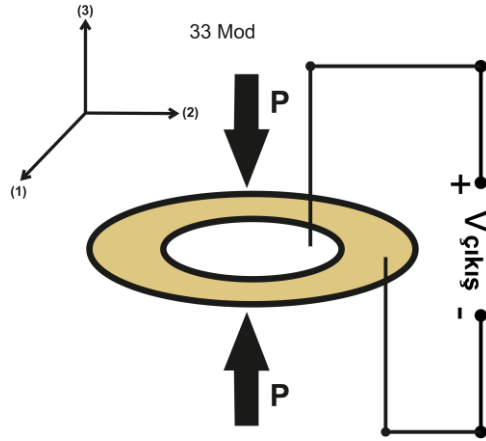


**Şekil 2.** Çıkış gerilimi ve darbe tepkisi [24]

### 3. Materyal ve Metod

Titreşimden ve/veya uygulanan basınçtan elektrik enerjisi üreten piezoelektrik seramik dönüştürücülerle ilgili giderek daha fazla çalışmalar yapılmaktadır. Okullarda zemine yerleştirilen piezoelektrik seramik dönüştürücülerle elektrik enerjisi elde etmek amacıyla yapılan bu çalışmada deney düzeneğinin zeminini oluşturmak için  $200 \times 300 \times 18$  mm ölçülerinde MDF kullanılmıştır. MDF, enerji hasadı için kullanılacak piezoelektrik malzemenin ve enerji hasat devresinin montajı için  $200 \times 90 \times 18$  mm ölçülerinde MDF ile iki tarafından yükseltilmiştir.

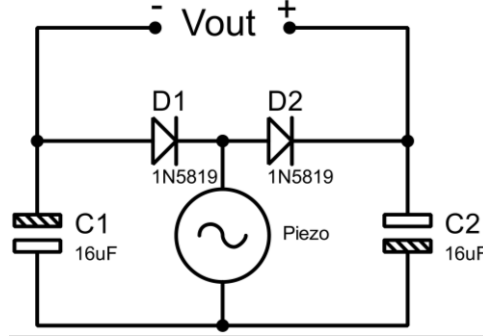
Piezoelektrik malzemeye uygulanan basınç yönüne göre kuplaj modu Şekil 3'te gösterildiği gibidir. Bu çalışmada piezoelektrik dönüştürücüye uygulanan basınç dik olduğu için d33 modunda çalışmaktadır.



Şekil 3. Piezoelektrik malzemeye uygulanan basınç yönüne göre koplaj modu

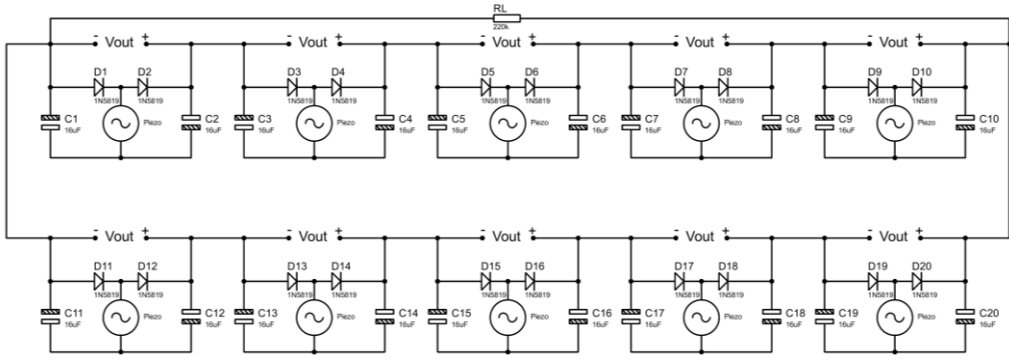
### 3.1. Arayüz devresi

PZT'lerin doğrudan seri veya paralel bağlantısı, birden fazla PZT içeren bir enerji toplayıcıda üretilen enerjiyi en üst düzeye çıkarmak için uygun bir strateji değildir[25]. Üretilen akım doğru akıma çevrilmek istendiğinde kullanılan yöntemlerden en yaygın olanı dört diyotlu köprü tipi tam dalga doğrultma devreleridir. Bu yöntemde her alternansta iki diyot akımı taşıdığından diyotlar üzerinde gerilim kayıpları oluşur. Bu yüzden birden fazla PZT'nin elektriksel bağlantısına çözüm sunan, her alternansta sadece bir diyot üzerinde gerilim düşen, gerilim kaybı az bir devre topolojisi kullanılmıştır. Bu işlem gerilim ikileyicilerle gerçekleştirilmiştir. Gerilim ikileyicilerin her biri iki adet 1N5819 schottky diyot ve iki adet 16  $\mu$ F 63 V kondansatör ile oluşturulmuştur. 1N5819 schottky diyotun ileri voltaj düşümü ( $V_F$ )  $I_F=0,1A$  iken 0,34V'tur. Bu sayede ileri voltaj düşümü yaklaşık 0,7V olan diyotlara göre avantaj sağlanarak, voltaj kaybı en az değere indirilmiştir. Şekil 4'te gerilim ikileyici devre şeması görülmektedir.



Şekil 4. Gerilim ikileyici devre şeması

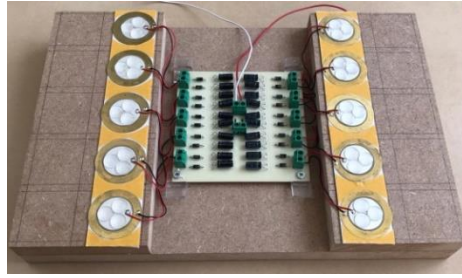
PZT'ler alternatif akım üretirler. Pozitif alternansta D2 diyotu iletme geçer. Bu durumda C2 kondansatörü şarj olur. Sadece D2 diyotu üzerinde gerilim düşümü olur, voltaj kaybı oluşur fakat pozitif alternanstaki voltaj kaybı tek diyotla sınırlıdır. Negatif alternansta D1 diyotu iletme geçer. Bu durumda C1 kondansatörü şarj olur. Sadece D1 diyotu üzerinde gerilim düşümü olur, voltaj kaybı oluşur fakat negatif alternanstaki voltaj kaybı da tek diyotla sınırlıdır. Ölçümlerde kullanılan piezoelektrik enerji hasat devresinin nasıl modellendiği Şekil 5'te gösterilmiştir. Devreye Kirchoff'un gerilimler kanunu uygulandığında RL yükü üzerindeki toplam gerilim, seri bağlı gerilim ikileyicilerinin üreteceği gerilimlerin toplamına eşit olacaktır.



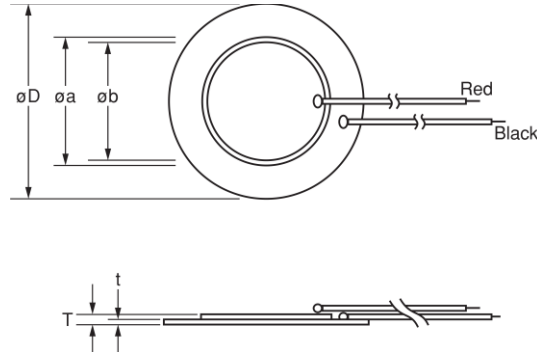
Şekil 5. Piezoelektrik dönüştürücülerin elektriksel bağlantısı

### 3. 2. Deney düzeneği

Deneyel çalışmada 10 adet 35mm çapında piezoelektrik malzeme satın alınarak kullanılmıştır. Bunlardan 5 tanesi deney düzeneğinin 200 mm'lik kenarı boyunca eşit aralıklarla dizilmiştir. 5 adet piezoelektrik malzeme ayrı ayrı 5 adet gerilim ikileyiciye bağlanmıştır ve 5 adet gerilim ikileyici birbirine seri olarak bağlanmıştır. Sonunda bu iki devre paralel bağlanarak Şekil 6'daki deney düzeneği elde edilmiştir. Şekil 7'de Murata firmasına ait 7BB-35-3L0 piezoelektrik malzemenin teknik verileri gösterilmiştir.



Şekil 6. PZT dizilimi ve piezoelektrik enerji hasat devresi



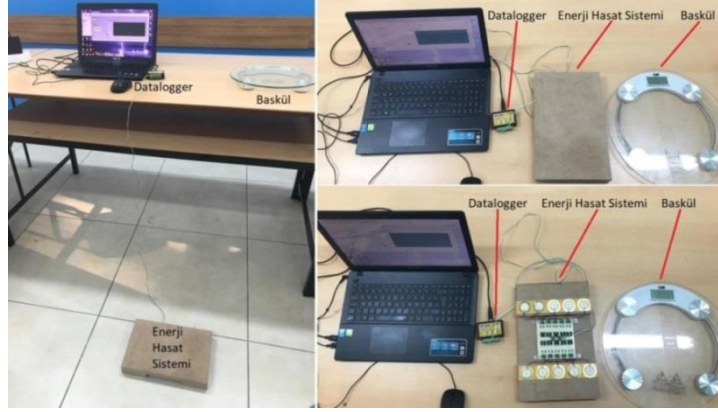
Ürün Adı	Plaka Çapı D (mm)	Element Çapı a (mm)	Elektrot Çapı b (mm)	Kalınlık T (mm)	Plaka Kalınlığı t (mm)	Plaka Malzemesi
7BB-35-3L0	35.0	25.0	23.0	0.53	0.30	Pirinç

Şekil 7. 7BB-35-3L0 piezoelektrik malzemenin teknik verileri [26]

Deney düzeneğinin üzerine basıldığında piezoelektrik malzemelerin zemine tam olarak etki edebilmesi için üzerlerine 3 mm yüksekliğinde silikon malzemeler yapıştırılmıştır. Böylece deney düzeneğine etki edecek dikey kuvvetin piezoelektrik malzemelere eşit olarak dağıtılması amaçlanmıştır.

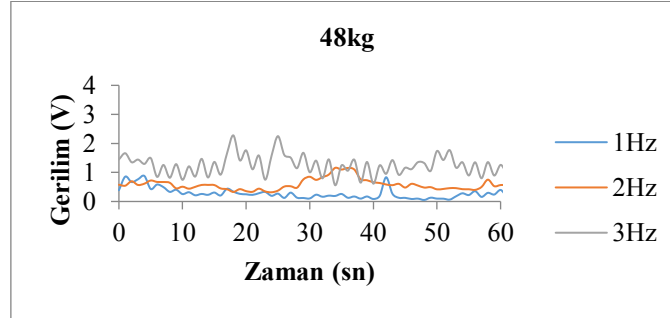
#### 4. Deneyleer

Şekil 8’de tasarlanan PEH ve deneysel kurulum gösterilmiştir. Sunulan PEH 48 kg, 58 kg, 71 kg, 85 kg ağırlık ve her biri için 1-2-3 adım/saniye adım sıklıklarında test edilmiştir. Adım sıklığı senkronizasyonu sanal metronom ile gerçekleştirilmiş, adım atanın metronomun frekansına uyması sağlanmıştır. Her bir ölçüm 60 sn boyunca alınmış ve datalogger kullanılarak kaydedilmiştir. Yük olarak 220 K $\Omega$  direnç kullanılmıştır.

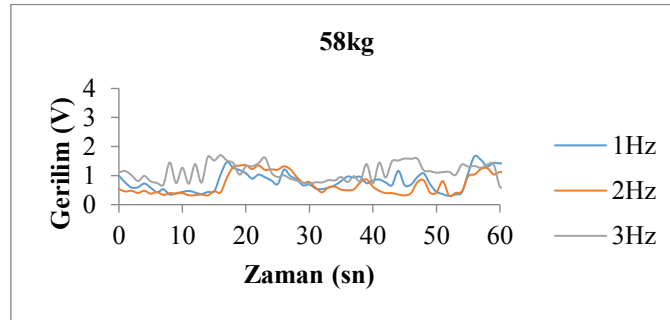


Şekil 8. Tasarlanan PEH ve deneysel kurulum

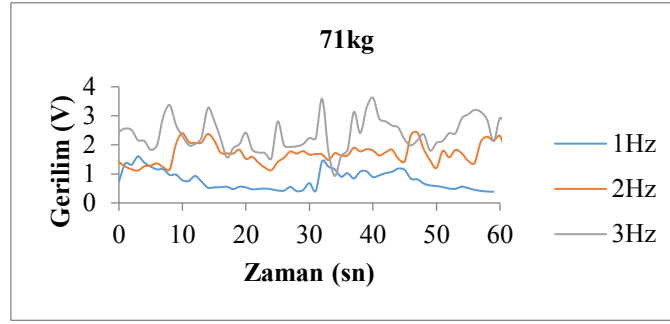
Deney düzeneğinin 48 kg, 58 kg, 71 kg ve 85 kg ağırlığındaki bireylerin yürüme hareketleriyle oluşturduğu çıkış voltajına ait grafikler sırasıyla Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir. Tablo 2’de hasat edilen anlık maksimum gerilimler ve hesaplanan anlık maksimum güçler gösterilmektedir.



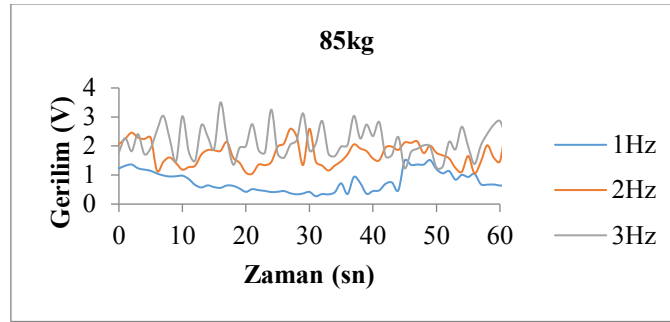
Şekil 9. 48 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye’deki PEH çıkış voltajı



Şekil 10. 58 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye’deki PEH çıkış voltajı



Şekil 11. 71 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye'deki PEH çıkış voltajı



Şekil 12. 85 kg ağırlığındaki bireyin 1, 2 ve 3 adım/saniye'deki PEH çıkış voltajı

Tablo 2. PEH maksimum çıkış voltajları ve güçleri

Test Ağırlığı (kg)	Yürüme Hızları (adım/saniye)	Hasat edilen maksimum gerilim (V)	Hasat edilen maksimum güç ( $\mu$ W)
48	1	0,87	3,44
	2	1,30	7,68
	3	2,27	23,42
58	1	1,66	12,53
	2	1,36	8,41
	3	1,70	13,14
71	1	1,60	11,64
	2	2,42	26,62
	3	3,62	59,57
85	1	1,51	10,36
	2	2,59	30,49
	3	3,50	55,68

## 5. Sonuç

Bu çalışmada ağırlıkları farklı dört birey, oluşturulan deney düzeneği üzerinde üç farklı hızda yürümüş ve enerji hasadı yapılmıştır. Anlık olarak üretilen maksimum gerilimlerde aynı bireyin adım hızı arttıkça hasat edilen gerilimin maksimum değerinin de arttığı görülmüştür. Aynı bireyin adım hızı arttıkça hasat edilen anlık gerilimlerin ortalama değerinin önemli ölçüde arttığı değerlendirilmiştir. Anlık gerilimlerin ortalamasına bakıldığında 48 kg birey için 1-2-3 adım/saniyede 0,27 V-0,58 V-1,25 V, 58 kg için 0,79 V-0,68 V-1,13 V, 71 kg için 0,78 V-1,68 V-2,35 V, son olarak 85 kg için 0,77 V-1,71 V-2,12 V hesaplanmıştır.

Bu çalışmada PZT'nin ürettiği gerilimin her alternansında hasat tek bir diyot ile sağlanmış, ileri voltaj düşümü ( $V_F$ )  $I_F=0,1A$  iken  $0,34V$  olan schottky diyot seçilmiş, diyot voltaj kaybı en aza indirilmiştir. Bu sayede verimlilik artırılmıştır.

Çalışma, PZT'ye uygulanan dört farklı ağırlık ve üç farklı yürüme hızının enerji hasadına etkisini göstermesi açısından özgün ve yapılacak diğer araştırmalara örnek olacak niteliktedir. Ayrıca önerilen deney düzeneğinin seri ve/veya paralel bağlantılarla birden fazla kullanılması durumunda hasat edilecek toplam akım ve gerilimin artırılması değerlendirilebilir.

### Kaynaklar

- [1] Zhang B., Liu H., Zhou S. et al. A review of nonlinear piezoelectric energy harvesting interface circuits in discrete components. *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.* 2022; 43: 1001-1026.
- [2] Akkaya Oy S. A design of mass-spring type piezoelectric energy harvesting. *Scientia Iranica D* 2021; 28(6): 3504-3511.
- [3] Li C., Yang F., Liu P., Fu C., Liu Q., Zhao H., Lin P. Development and Piezoelectric Properties of a Stack Units-Based Piezoelectric Device for Roadway Application. *Sensors* 2021; 21: 7708.
- [4] Cho J. Y., Kim K. B., Hwang W. S., Yang C. H., Ahn J. H., Do Hong S., ... & Sung T. H. A multifunctional road-compatible piezoelectric energy harvester for autonomous driver-assist LED indicators with a self-monitoring system. *Applied Energy* 2019; 242: 294-301.
- [5] Jeon D. H., Cho J. Y., Jhun J. P., Ahn J. H., Jeong S., Jeong S. Y., ... & Sung T. H. A lever-type piezoelectric energy harvester with deformation-guiding mechanism for electric vehicle charging station on smart road. *Energy* 2021; 218: 119540.
- [6] Shenck N., Paradiso J. Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezo-Electrics. *IEEE Micro* 2001; 21(3): 30-42.
- [7] Nimachwala A., Pandya A. Energy harvesting in the form of electricity by Piezo-Cells by placing them in a pair of shoes and storing energy in Power Bank. *Materials Today: Proceedings* 2022; 67(1): 51-55.
- [8] Wang J. X., Li J. C., Su W. B., Zhao X., Wang C. M. A multi-folded-beam piezoelectric energy harvester for wideband energy harvesting under ultra-low harmonic acceleration. *Energy Reports* 2022; 8: 6521-6529.
- [9] Yang Kuang, Tingwen Ruan, Zheng Jun Chew, Meiling Zhu, Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node. *Sensors and Actuators A: Physical* 2017; 254: 69-77.
- [10] Frontoni E., Mancini A., Zingaretti P., Gatto A. Energy harvesting for smart shoes: A real life application. *Proceedings of the ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2013*. 4. 10.1115/DETC2013-12310. American Society of Mechanical Engineers.
- [11] Starner T. Human Powered Wearable Computing. *IBM Systems J.* 1996; 35: 618-629.
- [12] Rocha J. G., Goncalves L. M., Rocha P. F., Silva M. P., Lanceros-Mendez S. Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2010; 57: 813-819
- [13] Iswanto, Sripto S., Mujahid F., Putra K.T., Apriyanto N.P., Apriani Yosi. Energy Harvesting on Footsteps Using Piezoelectric based on Circuit LCT3588 and Boost up Converter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2018; 8: 4104-4110.
- [14] Boutaldat M., Chakhchaoui N., Eddiai A., Meddad M., Cherkaoui O., Rguiti M., Mazroui M. H. Modeling and electromechanical performance analysis of polyvinylidene difluoride/textile-system for energy harvesting from the human body toward a novel class of self-powered sensors. *Polymers for Advanced Technologies* 2022; 33:.
- [15] Lim C. H., NajibAl-Fadhali, Majid H., Gismalla M., Mukred J. A. A., Najmaddin Abo Mosali. Footstep power generation using piezoelectric transducers. *Progress in Engineering Application and Technology* 2022; 3(1): 454-469.
- [16] Kymissis J., Kendall C., Paradiso J., Gershenfeld N. Parasitic power harvesting in shoes. *Digest of papers. Second international symposium on wearable computers (Cat. No. 98EX215)* 1998; :132-139.
- [17] Apriyanto N. P., Firmansyah E., Putranto L. M. Piezoelectric Energy Harvester for IoT Sensor Devices. *IJITEE (International Journal of Information Technology and Electrical Engineering)* 2021; 5(4): 124-129.
- [18] Qian F., Xu T. B., Zuo, L. Piezoelectric energy harvesting from human walking using a two-stage amplification mechanism. *Energy* 2019; 189: 116140.
- [19] Deng F., Cai Y., Fan X., Gui P., Chen, J. Pressure-type generator for harvesting mechanical energy from human gait. *Energy* 2019; 171: 785-794.
- [20] Zhong X., Wang H., Chen L., Guan M. Design and Comparative Study of a Small-Stroke Energy Harvesting Floor Based on a Multi-Layer Piezoelectric Beam Structure. *Micromachines* 2022; 13(5): 736.
- [21] Song G. J., Cho J. Y., Kim K. B., Ahn J. H., Song Y., Hwang W., Hong S. D., Sung T. H. Development of a pavement block piezoelectric energy harvester for self-powered walkway applications. *Applied Energy* 2019; 256: 113916.
- [22] Wang W., Cao, J., Bowen, C.R., et al. Optimum resistance analysis and experimental verification of nonlinear piezoelectric energy harvesting from human motion. *Energy* 2017; 118: 221-230.
- [23] Türkmen A.C., Çelik C. Energy harvesting with the piezoelectric material integrated shoe. *Energy* 2018; 150: 556-564.
- [24] Murata Manufacturing Co., Ltd., P19E7.pdf 02.6.26: 2-4.
- [25] Akkaya Oy S. A piezoelectric energy harvesting from the vibration of the airflow around a moving vehicle. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 2020; 30(12): e12655.
- [26] Murata Manufacturing Co., Ltd., P37E.pdf.

## Çinko Ekstraksiyon Artığından Korozyon Önleyici (Antikoroziv) Endüstriyel Çinko Kromat Kompleks Çözeltisi Üretimi

Zeynel Abidin SARI<sup>1\*</sup>, M. Deniz TURAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü-Metalurji Programı, İskenderun Meslek Yüksekokulu, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye

<sup>2</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*1 zeynel.sari@iste.edu.tr, <sup>2</sup> mdaturan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02/11/2023;

Kabul/Accepted: 19/02/2024)

**Öz:** Çinko ekstraksiyon artığı (Ç.E.A) önemli miktarda çinko, kurşun, vb. metal bileşikleri içerir, dolayısıyla ikincil bir metal kaynağı olarak kabul edilirler. Bu çalışmada, çinko ekstraksiyon artığının sülfürik asit ve potasyum dikromat varlığında çeşitli parametrelerde selektif olarak liç edilerek optimum şartlarda endüstriyel korozyon önleyici çinko kromat kompleks çözeltisi ( $Zn(CrO_4)^{2-}$ ) üretilmeye çalışılmıştır. Bunun için liç deneyleri, çoklu manyetik karıştırıcılı balon ısıtıcı bir düzenek vasıtasıyla 100 ml'lik cam balonlarda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan liç sıcaklığı ile birlikte çinko kazanımının arttığı diğer taraftan selektifliği azaltan demirin ise sınırlı oranda çözündüğü belirlenmiştir. Optimum şartlar olarak 0.5 M sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) derişimi, 0.5 M potasyum dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) derişimi, 368 K liç sıcaklığı, 180 dk liç süresi, 25 mL/g sıvı-katı oranı ve 600 rpm karıştırma hızında Zn ve Fe ekstraksiyon verimleri sırasıyla %81.5 ve %5.3 olarak bulunmuştur. Diğer taraftan liç çözeltisinde çinko kromat kompleksi varlığını ortaya koymak için yapılan Raman spektroskopisi analizinde  $Zn^{2+}$  iyonlarının kromat ( $CrO_4^{2-}$ ) ile koordinasyon halinde bulunduğu belirlendi. Raman spektroskopisi ile hesaplanan koordinasyon sayısının 3,6 olduğu ortaya çıktı, bu da çözeltide  $Zn(CrO_4)^{2-}$  mevcudiyetinin var olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca optimum şartlarda Pb'nin hiç çözünmediği ve liç kalıntısında sülfatları ve/veya kısmen kromatları şeklinde kaldığı saptandı.

**Anahtar kelimeler:** Çinko ekstraksiyon artığı, potasyum dikromat, sülfürik asit, çinko metali, endüstriyel çinko kromat kompleksi.

### Production of Anti-Corrosive Industrial Zinc Chromate Complex Solution from Zinc Extraction Residue

**Abstract:** Zinc plant residues contain significant amounts of zinc, lead, and other metal compounds, thus they are considered as a secondary source of metals. In this study, an attempt was made to produce industrial anti-corrosive zinc chromate complex solution ( $Zn(CrO_4)^{2-}$ ) under optimum conditions by selectively leaching the zinc plant residue under various parameters in the presence of sulfuric acid and potassium dichromate. For this purpose, leaching experiments were carried out in 100 ml glass flasks using a flasks heater device with multiple magnetic stirrers. According to the results obtained, it was determined that zinc recovery increased with increasing leaching temperature, while iron, which reduced selectivity, dissolved to a limited extent. As optimum conditions, 0.5 M  $H_2SO_4$  concentration, 0.5 M  $K_2Cr_2O_7$  concentration, 368 K leaching temperature, 180 min leaching time, 25 mL/g liquid-solid ratio and 600 rpm stirring speed, Zn and Fe extraction efficiencies were determined as 81.5% and 5.3%, respectively. On the other hand, in the Raman spectroscopy analysis performed to reveal the presence of zinc chromate complex in the leach solution, it was determined that  $Zn^{2+}$  ions were in coordination with chromate ( $CrO_4^{2-}$ ). The coordination number calculated by Raman spectroscopy turned out to be 3.6, which reveals the presence of  $Zn(CrO_4)^{2-}$  in solution. In addition, it was determined that under optimum conditions, Pb did not dissolve at all and remained in the form of sulfates and/or partially chromates in the leach residue.

**Key words:** Zinc plant residue, potassium dichromate, sulfuric acid, zinc metal, industrial zinc chromate complex.

#### 1. Giriş

Günümüzde çinko, alüminyum ve bakırdan sonra demir dışı metaller içerisinde dünyada miktar olarak tüketimi en fazla olan metallere biridir. Çinko, kimyasal açıdan aktif olması ve başka metallerle kolayca alaşım yapabilmesi nedeniyle, endüstride geniş tüketim alanı bulan ana maddesi çinko olan alaşımların ve bileşiklerin üretiminde kullanılan en popüler ve çok yönlü metallere birisidir. Çinko metali birincil ve ikincil kaynaklardan olmak üzere iki farklı yöntemle üretilmektedir. Birincil çinkonun kaynağı cevherlerdir. Çinkonun birincil

\* Sorumlu yazar: [zeynel.sari@iste.edu.tr](mailto:zeynel.sari@iste.edu.tr), Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5932-2141, <sup>2</sup> 0000-0002-2136-1425

kaynakları arasında çinko sülfür (ZnS), karbonat ( $ZnCO_3$ ), silikatlar ( $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ ) ve oksit (ZnO) mineralleri bulunur. Ayrıca, ABD Jeoloji Araştırması (USGS) tarafından tahmin edilen dünyanın tanımlanmış çinko kaynaklarının 2023 yılında yaklaşık 1.9 milyar ton olduğu bildirilmiştir. İkincil çinkonun kaynağı ise çinko külü, galvaniz atığı, elektrik ark ocağı, ve pirinç ergitme tozları, otomobil parçası hurdası, kimyasal atıklar, pres döküm atıkları ve Ç.E.A gibi farklı ikincil kaynaklardan geri kazanılır.

Çinko ekstraksiyon işlemi sırasında, çinko işleme tesislerinde günlük olarak büyük miktarda kalıntı oluşmaktadır. Bunlar genel açıdan Ç.E.A olarak adlandırılmakta olup çinkoya ek olarak kurşun, kadmiyum, arsenik vb gibi metallerde içermektedir. Çinko ekstraksiyon işlemi sırasında birincil çinko kaynaklarının bileşimi nedeniyle bu kalıntılar değerli metallerden germanyum, nikel, kobalt, gümüş ve altın içerebilmektedir. Birincil yüksek dereceli çinko cevherlerinin veya konsantrelerinin sınırlı mevcudiyetinin bir sonucu olarak, çinkonun ikincil kaynaklardan geri kazanılması hem oldukça ekonomik hem de çevre sorunları açısından önlenebilir görünmektedir.

Günümüzde metalik çinkonun büyük çoğunluğu asit liçi işlemi sırasında liç ortamında çinko ekstraksiyon artığı olarak tanımlanan büyük miktarda liç kalıntısı bırakan Kavurma-Liç-Elektro kazanım prosesi ile üretilmektedir [1] Bu durumda, büyük miktarda değerli metalin israfına neden olmaktadır [2]. Çoğu metalurjik proseslerde ortaya çıkan atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi yakın bir geçmişe kadar mümkün olmamaktaydı. Bu malzemelerin çevresel açıdan tehlikeli olduğu bilinmekle beraber, içerdikleri değerli metaller açısından (özellikle çinko) incelendiğinde; bunların değerli metallerin geri kazanımı için bir kaynak oluşturduğu düşünülmektedir. Günümüzde birincil ve ikincil çinko içeren kaynaklardan çinkonun kazanımında pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerin veya bunların kombinasyonunun uygulanabileceği bilinmektedir. Ancak bu yöntemler karşılaştırıldığında hidrometalurjik proseslerin çinko geri kazanımı daha yüksek olduğundan çinko içeriği düşük kaynaklar için daha uygun olduğu görülmektedir. Hidrometalurjinin diğer bazı operasyonel avantajlarının yanı sıra proses çevre açısından daha güvenli ve ekonomik açıdan nispeten daha uygundur. Dünyadaki çinko üretiminin neredeyse %80'i konsantre çinko veya oksitli bileşiklerinin seyreltilmiş sülfürik asit çözeltisinde muamele edilmesinden sonra elektroliz yöntemi ile üretilmektedir [3]. Karbonatlı cevherler kullanıldığı zaman ise, kalsineler Waelz prosesi ile üretilir ve bunu hemen klinker prosesi takip etmektedir. Her iki işlemle de elde edilen kalsine, hidrometalurjik çinko elde etme aşamalarından geçmektedir. Kavurma ve klinkerleştirme işlemleri sonucunda elde edilen çinkonun bir kısmı çinko oksit ( $ZnO$ ) formunda, bir kısmı ise artıkta çinko ferrit formundadır. Bununla birlikte liç artıklarındaki değerli metallerin morfolojik yapısı ve miktarları büyük oranda kullanılan cevherin karakteristiğine ve kullanılan üretim metotlarına bağlıdır. Waelz yöntemiyle elde edilen kalsinenin liç işlemi sonrası kalan Ç.E.A'da çinko çeşitli mineraller halinde bulunduğu ama sülfürlü cevherlerin kavrulması sonucu elde edilen kalsinenin liçinden sonra kalan Ç.E.A'da nispeten çinko ferrit ( $ZnO \cdot Fe_2O_3$ ) yapısında olduğu belirtilmektedir [4]. Diğer taraftan Ç.E.A'da bulunan kurşunun büyük ölçüde  $PbSO_4$  formunda kaldığı kısmen de  $PbO$  ve  $PbO_2$  formunda olduğu bildirilmektedir [5]. Çinko oksit,  $H_2SO_4$  çözeltisinde kolayca çözünürken çinko ferrit, nispeten yüksek sıcaklıklarda ( $90^\circ C$ 'nin üzerinde) ve daha yüksek derişimde  $H_2SO_4$  çözeltisi ( $50-150 \text{ g/L}$ ) gerektirebilmektedir [6]. Ayrıca kurşun sülfatın suda çözünürlüğü çok düşük olduğundan ( $20^\circ C$ 'de  $4.1 \text{ mg/100 mL}$ ) katı artıkta kalmaktadır [7]. Sonuç olarak Ç.E.A çözünmemiş sülfat halinde çinko, çinko oksitli yapılar ve çinko ferrit içerirler. Bundan dolayı bu artıkları azaltmak ve bunlardan değerli metallerin geri kazanımı son yıllarda büyük önem arz etmektedir.

Ç.E.A'dan değerli metallerin geri kazanılmasına yönelik yapılan çalışmalarda çoğunlukla hidrometalurjik yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Ç.E.A'dan değerli metallerin kazanımı üzerine yapılan bir çalışmada Ç.E.A sülfatlayıcı kavurma adımından sonra, ilk adımda su liçi gerçekleştirilerek optimum şartlarda çinkonun yaklaşık %86'sının kazanıldığı belirtilmektedir. İkinci adımda ise birinci adımdan kalan filtre kekinin NaCl ile liç işlemi yapılarak kurşunun optimum şartlarda %89 ekstrakte edildiği bildirilmektedir. Ayrıca birinci adımda selektifliği azaltan demirin ise optimum şartlarda %35 üzerinde çözelti ortamına geçtiği rapor edilmiştir [8]. Sıcak filtre keki olarak da bilinen Ç.E.A önemli miktarda çinko oksit ( $ZnO$ ) içermektedir. Ç.E.A'dan çinko, kobalt ve manganeezi kazanmak üzerine yapılan bir liç çalışmasında işlem prosesinin 3 kısma ayrıldığı bildirilmektedir. İlk adımda optimum koşullar olan,  $0.15 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ , 60 dk liç süresi,  $60^\circ C$  liç sıcaklığı ve  $20 \text{ mL/g}$  katı-sıvı oranında çinkonun %81.5'inin ekstrakte edildiği belirtilmektedir [9]. İran'daki bir tesisten temin edilen Ç.E.A'daki çinkonun optimizasyon yöntemiyle selektif olarak mekanokimyasal alkali liçi prosesiyle kazanımı üzerine bir çalışma yapılmıştır. Çalışmaya göre konvansiyonel alkali liç prosesinde  $9 \text{ M NaOH}$ ,  $25^\circ C$  ve  $45 \text{ dk}$ 'da çinkonun %82.4'ünün ekstrakte edildiği bildirilmiştir. Diğer taraftan çinkonun ekstraksiyon verimini arttırmak amacıyla bir atritör değirmende yapılan mekanokimyasal liç çalışmasında ise benzer şartlarda çinkonun %99.9'unun kazanıldığı belirtilmiştir. Alkali koşullarda ise demirin ortamda çözünmeden hidroksitleri formunda kaldığı ifade edilmektedir [10]. Geleneksel kavurma-liç-elektrokazanım prosesi yoluyla çinkonun hidrometalurjik üretiminde, çinko sülfür konsantresinin kavrulması sırasında, çinko ferrit, çinko oksit ile birlikte meydana gelmektedir. Bu



ferrit yapısındaki çinko ise katı artık olarak kalmakta ve belirli şartlar altında bir asit liçi ile geri kazanılabilmektedir. Bu durum ise yüksek düzeyde demir içeren bir çinko liç çözeltisi vermektedir. Bu yüksek demir seviyesi nedeniyle de çözeltinin nötr liç aşamasına geri dönüştürülmesi proses kısıtlamalarını meydana getirmektedir. Bu durumu aşmak amacıyla yapılan bir çalışmada  $Zn(OH)_2 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$  keki kullanılarak pH düzeyinin optimize edilmesi yoluyla liç çözeltisindeki demir seviyesinin kontrolüne yönelik bir araştırma sunulduğu rapor edilmiştir [11]. Diğer taraftan yapılan başka çalışmalarda  $H_2SO_4$  çözeltisi kullanılarak Ç.E.A'dan çinko kazanımının kinetiği literatürde rapor edilmiştir [12-15]. Ayrıca yüksek sıcaklık ve asit derişiminin ekstraksiyon oranını arttırabileceği ve bu reaksiyonlar için aktivasyon enerjisinin hesaplandığı bildirilmiştir [16]. Bununla birlikte Ç.E.A'dan çinko ve diğer değerli metalleri kazanmak amacıyla çeşitli asit çözeltilerinde mikrodalga [17], ultrason [18], basınç [19], biyoliç [20] ve mekanik aktivasyon [21-22] gibi geleneksel olmayan liç metotları da denenmiştir. Ama çalışmaların birçoğunda değerli metallerin kazanımının artmasının yanında çözeltinin selektifliğini azaltan demirinde ortamda yoğun bir şekilde çözüldüğü belirtilmektedir. Sonuç olarak Ç.E.A'dan şimdye kadar yapılan çalışmalarda çoğunlukla doğrudan  $H_2SO_4$  ve HCl gibi inorganik asitlerle selektif olmayan çinko kazanımı üzerine yoğunlaşmıştır. Ama bu çalışmada ilk defa  $H_2SO_4$  ve  $K_2Cr_2O_7$  ortamında Ç.E.A'dan çinko kazanımı ile birlikte selektifliği yüksek bir kompleks çözeltisinin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, Ç.E.A  $H_2SO_4$  ve  $K_2Cr_2O_7$  varlığında liç edilmesiyle selektif endüstriyel korozyon önleyici (antikorozyf) çinko kromat kompleks çözeltisi ( $Zn(CrO_4)^{2-}$ ) üretimi çalışılmıştır.  $H_2SO_4$  konsantrasyonu,  $K_2Cr_2O_7$  konsantrasyonu ve liç sıcaklığı gibi ekstraksiyon verimliliğini etkileyen parametreler araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Zn ve Fe ekstraksiyon verimliliklerinin sırasıyla %81.5 ve %5.3 olduğu belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

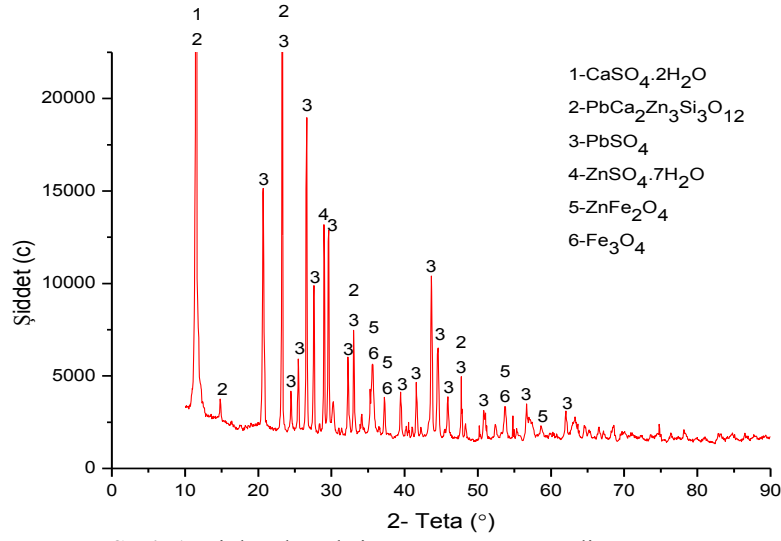
Deneylerde kullanılan Ç.E.A, çalıştığı dönemlerde Kayseri Çinkur tesisindeki atık sahasından temin edilmiştir. Günümüzde ise söz konusu tesis Çinkom adı ile faaliyetlerine devam etmektedir. Deneylerde kullanılacak Ç.E.A halkalı bir değirmende topaklanmaların dağıtılması ve belirli bir başlangıç tane boyutuna getirilmesi için bir takım ön öğütme ve eleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Eleme işleminden sonra -200 mesh (-74  $\mu m$ ) tane boyutuna sahip Ç.E.A kapalı bir kaptaki muhafaza edilerek tüm deneylerde kullanılmıştır. Diğer taraftan söz konusu artığın kimyasal bileşimi mikrodalga çözünürleştirme ünitesinde elde edilen çözeltinin ICP-OES (İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektrometresi-Perkin-Elmer, Optima 2000DV) cihazında analiz edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Ç.E.A kimyasal bileşimi Tablo 1'de görülmektedir. Ayrıca artığın XRD (X-Ray Difraksiyon- Malvern Panalytical EMPYREAN) karakterizasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi XRD analizi sonuçlarına göre Ç.E.A numunesi ağırlıklı olarak  $PbSO_4$ ,  $PbCa_2Zn_3Si_3O_{12}$  ve  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  fazlarından oluşmuştur. Ayrıca artığın bir kısmında zayıf yoğunluklarda franklinit ( $ZnFe_2O_4$ ) yapısına da rastlanılmıştır. Optimum koşullardaki çinko kromat kompleks çözeltisinde raman spektroskopisi (Renishaw-Invia) analizi Peltier soğutmalı CCD dedektörlü ve bir Olympus BH-2 eş odaklı mikroskoba bağlı 514 nm (argon) lazer altında 200–4000  $cm^{-1}$  dalga aralığında 1  $cm^{-1}$  spektral çözünürlükle toplanarak gerçekleştirilmiştir.

Liç deneyleri, sıcaklığı ve karıştırma hızı dijital olarak ayarlanabilen çoklu manyetik karıştırıcı balon ısıtıcı bir düzenek vasıtasıyla teflon kaplı manyetik karıştırıcı kullanılarak geri soğutucuya bağlı 100 mL'lik şilifli cam balonda gerçekleştirilmiştir.

Ç.E.A liç işlemi atmosferik koşullarda sülfürik asit ( $H_2SO_4$  %95-97, Merck) ve potasyum dikromat ( $K_2Cr_2O_7$  %99.9, Merck) varlığında yapılmıştır. Hesaplanan miktarda stok çözeltiden otomatik pipetle alınan  $H_2SO_4$  ve belirlenen miktarda hassas terazide tartılan potasyum dikromat ile 25 ml'lik çözelti hazırlandıktan sonra hesaplanan miktarda katı (Ç.E.A) ilave edilerek balon ısıtıcılı manyetik karıştırıcıya yerleştirildi ve daha sonra seçilen liç değışkenlerinin metal çözünmesi üzerine etkileri araştırılmıştır. Liç deneylerinin sonunda içerikler mavi bant süzgeç kâğıdından süzülükten sonra elde edilen çözeltilerde çinko, demir ve kurşun metal içerikleri AAS (Atomik Absorbsiyon Spektrometresi-Perkin Elmer, AAnalyst 400 Modeli) cihazı kullanılarak metaller açısından analiz edilmiştir.

**Tablo 1.** Çinko ekstraksiyon artığının kütlece kimyasal bileşimi

Element	Zn	Fe	Pb	Si	Ca	Al
%	8.21	6.01	14.78	7.44	5.92	1.70



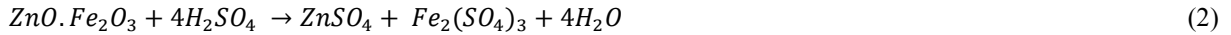
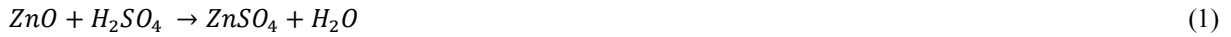
Şekil 1. Çinko ekstraksiyon artığının XRD diyagramı

### 3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

Deneysel çalışmalarda,  $H_2SO_4$  ve  $K_2Cr_2O_7$  ile geleneksel liç koşullarında (atmosferik şartlarda) Ç.E.A'dan çeşitli metallerin (Zn, Fe, Pb) çözünme davranışına bağlı olarak optimum koşullarda selektif endüstriyel korozyon önleyici (antikorozif) çinko kromat kompleks çözeltilisi elde edilmesi için çeşitli şartlarda deneysel parametreler çalışılmıştır. Çalışmada incelenen parametreler şu şekildedir:  $H_2SO_4$  derişimi: 0.5-2 M,  $K_2Cr_2O_7$  derişimi: 0-0.5 M, liç sıcaklığı: 298-368 K ve liç süresi: 15-240 dk'dır.

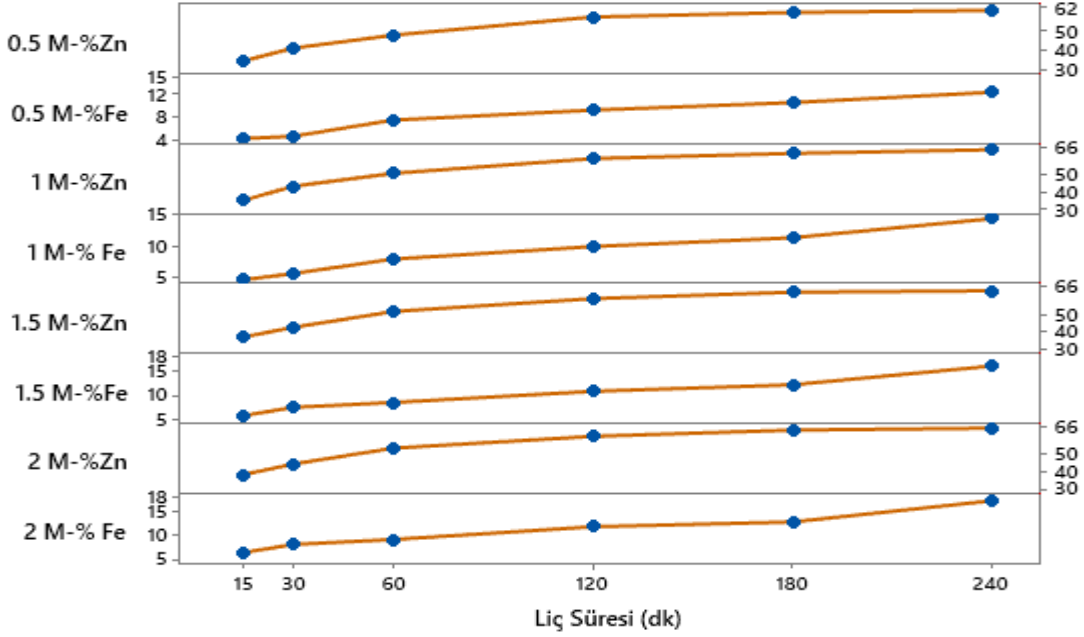
#### 3.1. $H_2SO_4$ derişiminin etkisi

Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda, çinko oksit ( $ZnO$ ) ve çinko ferrit ( $ZnO \cdot Fe_2O_3$ ) derişik sülfürik asitte çözünebilen en önemli bileşikler olduğundan, sülfürik asit çoğunlukla cevherlerden veya ikincil kaynaklardan çinkonun hidrometalurjik ekstraksiyonu için kullanılmaktadır. Bununla birlikte çinko oksit, seyreltik sülfürik asitle bile çözülebilirken, çinko ferrit etkin liç şartları sağlanmadan kolayca çözülemez. Çinko oksit ve çinko ferrit, aşağıdaki reaksiyonlara göre sülfürik asit ile reaksiyona girmektedir (Reaksiyon 1,2) [23] Burada reaksiyon (2) yavaş hızda gerçekleşir ve hızını arttırmak için ise yüksek sıcaklık gerekmektedir [24].



Bu çalışmada asit derişiminin etkisi 0.5, 1, 1.5 ve 2 M  $H_2SO_4$  çözeltilisi kullanılarak incelenmiştir. Buna göre değişen liç süresi ile birlikte sülfürik asitin Ç.E.A'dan Zn geri kazanımı ve Fe çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 2' de gösterilmektedir. Buna göre sabit sıcaklık ve dikromat derişiminde artan asit derişimi ile birlikte çinko ekstraksiyonun pek fazla değişmediği demir çözünmesinin ise nispeten arttığı gözlemlenmiştir. (LI ve ark., 2013) [25], tarafından Ç.E.A ile asit liç kinetiği üzerine yapılan bir çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin 50-150 g/L arasında değişen  $H_2SO_4$  derişim çalışmalarda belirli bir sürenin sonunda çinko ekstraksiyon verimlerinin neredeyse tüm konsantrasyon çalışmalarda %85 civarında olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada ise en düşük asit konsantrasyonu olan 0.5 M ve 180 dk liç süresi sonunda çinko ve demir ekstraksiyonlarının sırasıyla %60 ve %12 civarında olduğu belirlendi. Ayrıca tüm derişim çalışmalarda 15-240 dakika arasında artan liç süresiyle birlikte çinko ve demir ekstraksiyonunun belirgin bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Ama bu artış hızının 120 dakikalık liç süresi sonunda yavaşladığı bu değerde en yüksek asit derişiminde çinko ve demir çözünmesinin sırasıyla yaklaşık olarak %60 ve %11 civarında olduğu belirlendi. Maksimum oranda çinkonun ekstrakte edilerek çinko kromat kompleks çözeltilisi meydana getirmek amacıyla yapılan asit konsantrasyonu çalışmasında asit konsantrasyonun artmasına rağmen en iyi şartlarda çinkonun neredeyse yarısının çözünmesi, Ç.E.A'daki çinkonun düşük sıcaklıklardaki liç işleminde çözünemez çeşitli bileşikler halinde bulunduğunu göstermektedir. Örneğin 0.15

M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile Ç.E.A üzerine (Fattahi ve ark, 2016) tarafından yapılan bir liç çalışmasında 45 °C’i aşmayan düşük sıcaklıktaki liç işlemlerinde çinko ekstraksiyonunun %50-60 civarında kaldığı ifade edilmektedir [9].



Şekil 2. Metal ekstraksiyonu üzerine değişen liç süresi ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> derişiminin etkisi (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> konsantrasyonu: 0.3 M; liç sıcaklığı: 318 K; sıvı-katı oranı: 25 mL/g; karıştırma hızı: 600 rpm)

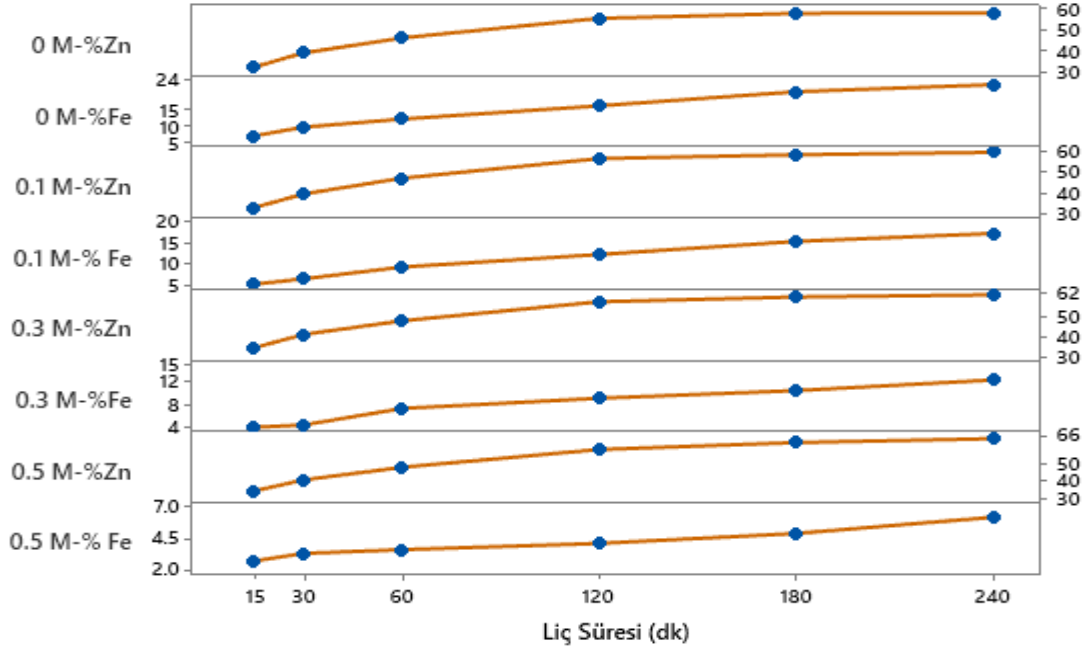
### 3.2. K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> derişiminin etkisi

K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> derişiminin etkisi 0.1, 0.3 ve 0.5 M dikromat çözeltisi kullanılarak incelenmiştir. Buna göre değişen liç süresi ile birlikte potasyum dikromatın Ç.E.A’da Zn geri kazanımı ve Fe çözünmesi üzerindeki etkisi Şekil 3’de gösterilmektedir. Buna göre sabit sıcaklık ve 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>’de artan dikromat derişimi ile birlikte çinko çözünmesinin neredeyse hiç etkilenmediği buna karşın demir ekstraksiyonu üzerine negatif etkiye sahip olduğu belirlendi. Dikromatın hiç bulunmadığı ve 0.5 M derişiminde 180 dk’lık liç süresi sonunda çözeltideki demir oranının sırasıyla %20.2 ve %4.9 olduğu hesaplandı. Bu durumda artan dikromat iyon varlığının demirin iyonik olarak bulunmasını baskıladığı söylenebilir. Ayrıca tüm konsantrasyon çalışmalarında, 15-240 dakika arasında artan liç süresi ile birlikte 0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>’de elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında çinko ekstraksiyonun pek fazla değişmediği ama artan dikromat konsantrasyonu ile birlikte demir ekstraksiyonun azaldığı belirlenmiştir. Örneğin, dikromatın bulunmadığı ortamda 240 dakikalık liç süresi sonunda ortamda çözünen demir miktarı 0.5 g/L iken en yüksek dikromat derişimi olan 0.5 M’da bu oran 0.2 g/L’ye düşmektedir. Bu durumda en yüksek dikromat konsantrasyonlu ortamda çözünen demirin %60 oranında azaldığı söylenebilir. Bu durumda dikromat derişiminin artmasıyla birlikte demir ekstraksiyon değerinin azalması daha ileri kimyasal açıklamaları zorunlu kılmaktadır.

Ç.E.A’da silikat, ferrit ve manyetit yapıda bulunan demirin düşük ekstraksiyon değeri, Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup> ve/veya HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup> gibi kromat türlerinin adsorpsiyonundan kaynaklanan Ç.E.A partikül yüzeylerinin pasifleşmesi olarak gösterilebilir. Bu anyonik türlerin adsorpsiyonu, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> iyonlarının Ç.E.A’daki ana demir fazları ile temasını engellemektedir. Bu durumda da çözünme oranı oldukça sınırlı kalmaktadır. Ayrıca bu durum daha önce bakır cürufundan Cu ve Fe gibi metallerin çözünürlüğünü incelemek amacıyla H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve dikromatlı ortamda yapılan bir liç çalışmasında yüksek bakır ekstraksiyonuna rağmen düşük demir çözünürlüğünün nedenleri ile oldukça uyumludur [26-27]. Ayrıca dikromat varlığında düşük demir ekstraksiyonu, demir ile çözünmeyen kromat bileşiklerinin oluşması ve/veya mevcut yüksek oksidatif koşullar altında demir (III)’ün hidrolize edilmesi gibi diğer nedenlerden kaynaklanabiliyor olabilir. Örneğin yapılan bir çalışmada nispi asidik koşullar altında Fe(III)-Cr(VI) sisteminde bazı çözünmeyen demir kromat bileşiklerinin oluşumunun mümkün olduğu bildirilmiştir [28]. Ayrıca başka bir çalışmada K-Fe(III)-Cr(VI)-H<sub>2</sub>O sistemi için yüksek bir potasyum dikromat derişimi ve asidik koşullar altında, KFe<sub>3</sub>(CrO<sub>4</sub>)(OH)<sub>6</sub> ve KFe(CrO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O gibi bazı çözünmeyen potasyum demir kromat

bileşiklerinin oluşumu rapor edilmiştir [29]. Diğer taraftan sülfürik asitli bir ortamda potasyum dikromatın mevcudiyetinde bakır cürüfları üzerine yapılan bir çalışmada dikromat konsantrasyonunun demirin çözünmesi üzerine pek pasifleştirici bir etkiye sahip olmadığı vurgulanmıştır [30].

Sonuç olarak liç prosesinde ortamda çinko kromat kompleks çözeltisi elde edilirken seçiciliği azaltan demirin nispeten çözünmesi oldukça seçimli bir işlem yapıldığını göstermektedir. Çünkü hidrometalurjik işlem sırasında, çözeltide istenilen metalle birlikte istenmeyen türlerde çözünür. Bu safsızlıklar da ancak seçici çökeltme (jarosit, hematit, geotit), sementasyon, solvent ekstraksiyonu ve iyon değişimi gibi ekstra maliyet arttırıcı yöntemlerle giderilir [31].



Şekil 3. Metal ekstraksiyonu üzerine değişen liç süresi ve  $K_2Cr_2O_7$  derişiminin etkisi ( $H_2SO_4$  derişimi: 0.5 M; liç sıcaklığı: 318 K; sıvı-katı oranı: 25 mL/g; karıştırma hızı: 600 rpm)

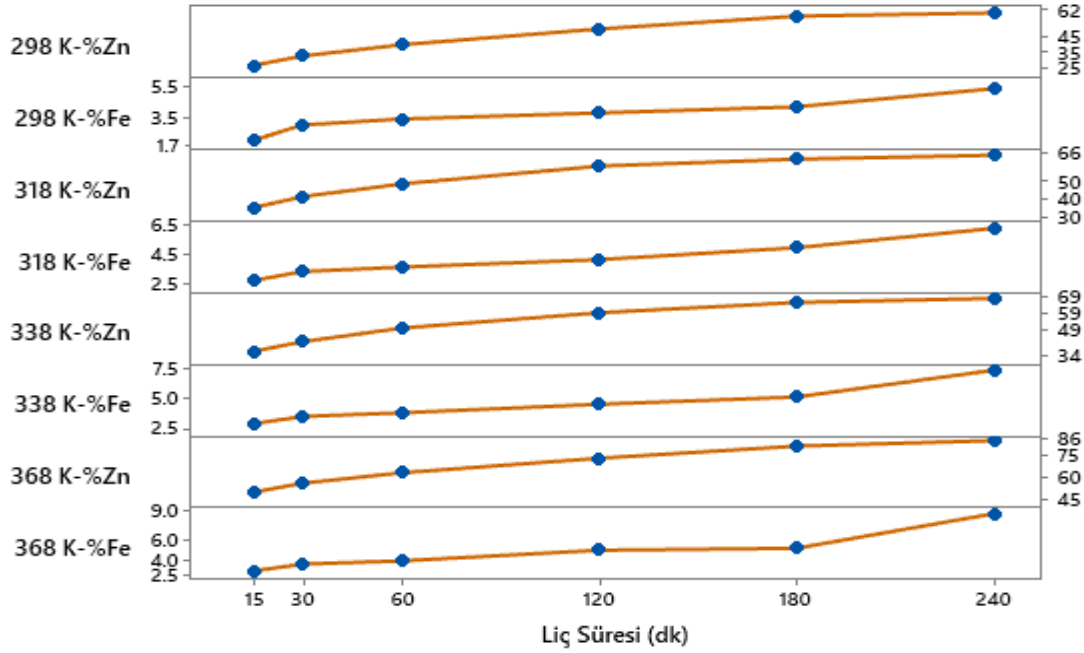
### 3.3. Liç sıcaklığının etkisi

0.5 M  $H_2SO_4$  ve 0.5 M  $K_2Cr_2O_7$  derişimlerinde Ç.E.A'dan metallerin çözünmesi üzerine liç sıcaklığının etkisini görebilmek amacıyla, normal ortam sıcaklığından kaynamaya yakın bir sıcaklığa kadar farklı sıcaklıklarda liç işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil. 4'de görülmektedir. Şekilde verilen sonuçlar detaylı incelendiğinde, çinko kazanımının ortam sıcaklığı olan 298 K'den 368 K'e kadar olan artışında belirgin bir şekilde değişmediği buna karşın sıcak asit liçi olarak tarif edilen 368 K'deki sıcaklıklarda maksimum kazanım oranının artan süreyle birlikte %80'lere kadar ulaştığı görülmüştür.

Belirli bir noktadan sonra liç sıcaklığı artarken çözücü ve çözünen moleküllerin kinetik enerjisi de artacağından hareketli parçacıkların artan çarpışma sayısı dolayısıyla çözünme hızı ve reaksiyon hızı da artacaktır. Bu durum çözünen madde miktarını da buna paralel arttıracaktır. Katı maddelerin sıvı içindeki çözünme reaksiyonları endotermik olduğu için, sisteme ısı verildiğinde, bu durum ısının çözünme enerjisi olarak kullanılmasını sağlayacak ve artan sıcaklıkla çözünme artacaktır. Bununla birlikte liç sıcaklığının artmasıyla liç reaksiyon hızının buna göre artması ve aynı zamanda çözeltilinin viskozitesinin azalması, liç solventinin ve ürününün difüzyonuna yardımcı olacaktır. Deneysel çalışmalar için bakıldığında 368 K optimum liç sıcaklığı olarak seçilmiştir. Çünkü laboratuvar ortamında kaynama sıcaklığının çok üzerindeki değerlerde atmosferik koşullarda çalışma bazı fiziksel tehlike ve riskler içerebilmektedir. Ayrıca literatürde Ç.E.A'da bulunan yapısal çeşitli mineral fazlarından dolayı sıcak asit liçi olarak genellikle 368 K seçilmesi proses maliyeti açısından genellikle uygun görülmüştür [23]. Diğer taraftan, çinkonun yüksek sıcaklığa rağmen ekstraksiyon oranının belirli bir değerde kalması çinkonun Ç.E.A içerisinde yeterince çözünmeyen ve çözünmesi zor olan ferritik ve silikatlı gibi farklı yapılarda bulunmasına bağlanabilir.  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  yapısı suda kolayca çözünebilirken çinko ferrit (franklinit,  $ZnFe_2O_4$ ) ve çinko silikat (willemit,  $Zn_2SiO_4$ ) değişen asit derişimine bağlı olarak sıcak sülfürik asit

de çözünebilir [32]. Örneğin, sülfürik asitli ortamda Ç.E.A'dan çinkonun geri kazanımı üzerine yapılan bir çalışmada liç sıcaklığı olarak doğrudan 368 K seçilmiş ve optimum şartlarda %80 üzerinde çinko kazanıldığı belirtilmektedir [33]. Ayrıca yapılan başka bir çalışmada ise çinko ekstraksiyonunun liç süresiyle birlikte arttığını ama sıcaklığın 298'den 353 K'ye çıkarılmasının liç sistemini pek iyileştirmediği ifade edilmektedir [34].

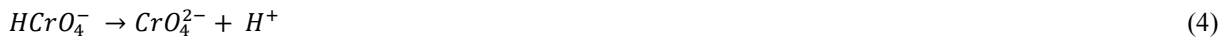
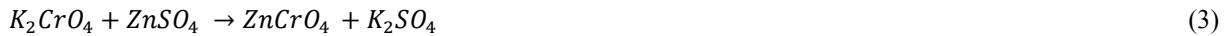
Diğer taraftan tüm deneysel süreç boyunca kurşunun sulu ortamda hiç çözünmediği liç kalıntısında sülfürik asitli ortamda çok düşük çözünürlüğe sahip olan kurşun sülfatları ( $PbSO_4$ ) (25 °C'de suda 0.0404 g/mL) ve/veya kromatları şeklinde kaldığı belirlendi. Ayrıca liç artığında daha sonra yapılacak olan bir NaCl liç işlemi ile Pb'nin selektif olarak kazanılabileceği de söylenebilir.



Şekil 4. Metal ekstraksiyonu üzerine değişen liç süresi ve liç sıcaklığının etkisi ( $H_2SO_4$  derişimi: 0.5 M;  $K_2Cr_2O_7$  derişimi: 0.5 M; sıvı-katı oranı: 25 mL/g; karıştırma hızı: 600 rpm)

### 3.4. Optimum liç koşullarında liç çözeltisinin raman spektrumları

Liç ortamında iyonik olarak çözünen çinkonun kromat iyonları ile çinko kromat kompleks çözeltisi meydana getirdiği aşağıdaki reaksiyon 3'e göre söylenebilir. Çinko kromat, çinko kationu ( $Zn^{2+}$ ) ve kromat anyonu  $CrO_4^{2-}$  tarafından oluşturulan iyonik bir bileşiktir. Ayrıca  $Zn^{2+}$  iyonları ile altı değerlikli kromun elektronik yapıları incelendiğinde elektronik yörüngeleri tamamlandığından her iki yapıda oldukça kararlıdır. Diğer taraftan suda zayıf çözünürlüğe (3,08 g / 100 g  $H_2O$ ) sahip olan çinko kromat bileşiği asitlerde ve sıvı amonyakta kolaylıkla çözünmektedir. Kromatın oluşum türleri incelendiğinde pH 1'den daha düşük olduğunda ana tür  $H_2CrO_4$  bileşiği şeklindedir. Bu da aşağıdaki reaksiyon 4'deki gibi çözünerek  $Zn^{2+}$  iyonları ile reaksiyon 5'deki gibi çinko kromat kompleksi vermektedir.



Buna bağlı olarak optimum şartlardaki liç sonunda elde edilen çözeltide oluşan çinko kromat kompleks çözeltisinin varlığını ispatlamak amacıyla sıvıda raman spektroskopisi analizi yapılmıştır. Raman Spektroskopisi, kimyasal yapı, faz ve polimorfi, kristallik ve moleküler etkileşimler hakkında ayrıntılı bilgi sağlayan, tahribatsız bir kimyasal analiz tekniğidir. Işığın bir malzeme içindeki kimyasal bağlarla etkileşimine dayanır. Raman

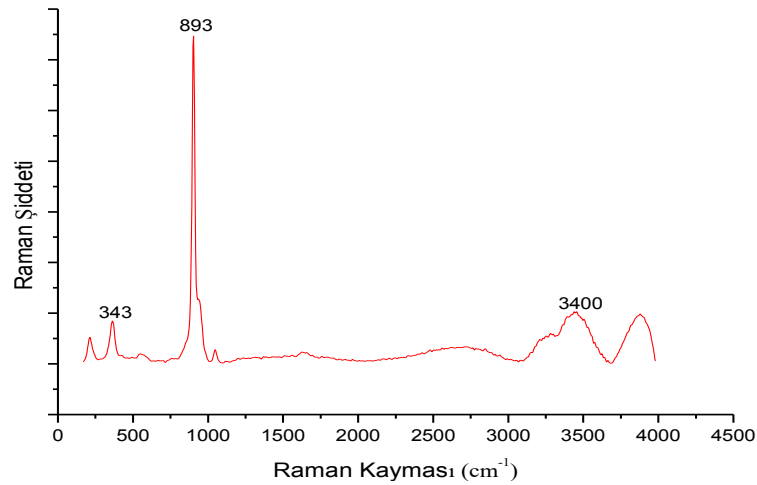
spektroskopisi, sulu çözeltilerdeki çinko(II) komplekslerinin farklı yapılarını karakterize etmeye yönelik hassas yöntemdir. Optimum liç koşullarında (0.5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.5 M K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, 368 K liç sıcaklığı, 180 dakika liç süresi, 1:25 katı-sıvı oranı ve 600 rpm karıştırma hızı) elde edilen liç çözeltisinin farklı dalga oranlarında ortaya çıkan raman analizi grafiği Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekilde Zn<sup>2+</sup> iyonlarının CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ile koordinasyonunu işaret etmektedir. Çinko kromat kompleks çözeltisinin raman spektrumu 0 ila 4000 cm<sup>-1</sup> aralığında gösterilmektedir. Buna göre 893 ve 343 cm<sup>-1</sup>'de var olan baskın pikler sırasıyla koordineli çinko kromat kompleksi ve serbest kromat anyonu pikleri olarak tanımlanmıştır [35-36]. Diğer taraftan 3400 cm<sup>-1</sup> civarındaki zirve pik ise su moleküllerinin OH gerilmesi modlarına karşılık gelmektedir [35]. Zn<sup>2+</sup> koordinasyonu hakkında daha fazla bilgi edinmek için, raman spektrum eğrisi uyumundan Zn<sup>2+</sup> katyonları etrafındaki ortalama kromat anyonlarının sayısı Denklem 6 ile hesaplanmıştır [37].

$$N = \frac{A_{Co}/A_t}{x} \quad (6)$$

Burada  $A_{Co}$ , kromat anyonuyla koordineli Zn<sup>2+</sup> iyonunun tepe alanını ifade etmektedir;  $A_t$ , koordineli (893 ve 343 cm<sup>-1</sup>'deki bantta) ve serbest kromat anyonlarının toplam tepe alanıdır;  $x$ , Zn<sup>2+</sup> mol derişiminin toplam kromat anyonu mol derişimine oranıdır. Örneğin 893 cm<sup>-1</sup> bantta denklem (6) ile hesaplanan koordinasyon sayısı 3,6 olup Zn(CrO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> kompleksinin oluştuğunu gösterir. Sonuç olarak, Zn<sup>2+</sup> iyonları 4 CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iyonları ile koordine edilerek Zn(CrO<sub>4</sub>)<sup>2-</sup> formunda bir kompleks elde edilmiştir. Diğer taraftan 4 ve 6 koordinasyon sayısına sahip metaller en kuvvetli kompleks teşkil edici olarak ifade edilmektedir. Ayrıca Zn<sup>2+</sup> iyonları maksimum 4 koordinasyon sayısına sahiptir.

Çinko kromat (ZnCrO<sub>4</sub>), kokusuz sarı toz veya sarı-yeşil kristaller olarak görünen kromat anyonu içeren, ancak kaplamalarda çinko kromat kullanıldığında sıklıkla pigment ilave edilen kimyasal bir bileşiktir. Söz konusu ürün kromat dönüşüm kaplamalarında endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Endüstride kullanılmak üzere çinko kromat oluşturmak için Cronak işlemi olarak bilinen bir işlem uygulanmaktadır. Bu işlem, çinko veya çinko kaplı bir metalin bir potasyum dikromat ve H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine birkaç saniye konulmasıyla yapılmaktadır. Çinko kromat ayrıca nötr potasyum kromat ve çinko sülfat (ZnSO<sub>4</sub>) kullanılarak da sentezlenebilir. Çinko kromatın ana kullanım alanı ise demir veya kaplama olarak endüstriyel boyamadır. Ayrıca havacılık ve otomotiv endüstrileri için çeşitli boya kaplamalarında üstün korozyon direnci sağladığı için kullanılmaktadır. Diğer taraftan havacılıktaki alüminyum alaşımlarında, uçaklarda kokpit, iniş takımı iç kısımları, elektronik bölmeler gibi gövdenin iç kısımların genel boyasında, sprey boyalarda ve verniklerde anti-korozif ve pas önleyici bir astar olarak kullanımı da mevcuttur.

Çinko kromatın üstte sayılan kullanım alanları ve üretim yöntemi dikkate alındığında bizim ortaya koymuş olduğumuz çinko kromat kompleksi üretim prosesinde elde edilen çözeltinin de uzun vadede geliştirilerek alternatif bir ürün olarak kullanılabileceği söylenebilir. Bu açıdan da çalışmanın ticari bir önemi olduğu düşünülmektedir. Elde edilen ürünün selektifliği ve piyasadaki muadilleri ile karşılaştırıldığında, korozyon önleme, endüstriyel kaplamalar ve bazı su arıtma tekniklerinde başarı ile kullanılabileceği varsayılmaktadır.



Şekil 5. Optimum liç koşullarında liç çözeltisindeki Zn (II) iyonları ve kromat anyonları arasında meydana gelen kompleksin raman spektrumları

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, inkur atık sahasından temin edilen .E.A  $H_2SO_4$  ve  $K_2Cr_2O_7$  varlığında atmosferik koşullarda liç işlemine tabii tutulmuştur. Çinkonun selektif olarak optimum çözündüğü koşullar saptanarak endüstriyel korozyon önleyici çinko kromat kompleks özeltisi ( $Zn(CrO_4)^{2-}$ ) üretilmiştir. Metal çözünmesi üzerine çalışılan liç parametreleri içerisinde liç sıcaklığı ve süresinin oldukça etkin olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 0.5 M  $H_2SO_4$  derişimi, 0.5 M  $K_2Cr_2O_7$  derişimi, 368 K liç sıcaklığı, 180 dk liç süresi, 25 mL/g sıvı-katı oranı ve 600 rpm karıştırma hızında Zn ve Fe ekstraksiyon verimleri sırasıyla %81.5 ve %5.3 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan liç çözeltisinde çinko kromat kompleksinin varlığını ortaya koymak için yapılan Raman spektroskopisi analizinde  $Zn^{2+}$  iyonlarının  $CrO_4^{2-}$  ile koordinasyon halinde bulunduğu belirlenmiştir. Raman spektroskopisi ile hesaplanan koordinasyon sayısının 3,6 olduğu ortaya çıktı, bu da özeltide  $Zn(CrO_4)^{2-}$  mevcudiyetinin var olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca optimum şartlarda Pb'nin hiç çözünmediği ve liç kalıntısında sülfatları ve/veya kısmen kromatları şeklinde kaldığı saptanmıştır. Bununla birlikte, liç kalıntısı üzerinde daha sonra belirli şartlarda yapılacak olan bir NaCl liç işlemi ile kurşun selektif olarak geri kazanılarak .E.A'nın tüm proses boyunca ekonomik ve çevresel faydaları en üst düzeye çıkarılabilecektir.

Sonuç olarak, endüstriyel çinko kromatın üretimi mümkün olmakla birlikte bizim yapmış olduğumuz çalışmada ise bir artıktan yola çıkarak endüstriyel olarak sprey halinde korozyon mukavemetini arttırmak için kaplama ya da pasivizasyon işlemleri gibi birçok alanda kullanılabilen antikorozif bir ürün başarı ile elde edilmiştir. Böylelikle hem artığın değerlendirilmesi sağlanmış hem de çevresel etkileri uygun bir üretim akım şeması ile bertaraf edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca .E.A'dan çinko kromat çözeltisi üretiminde uygulanan konvansiyonel liç işleminin, hidrometalurjik ekstraksiyonu geliştirmek için hızlı ve etkili bir araç olduğu doğrulanmıştır.

#### Teşekkür

Desteklerinden dolayı İskenderun Teknik Üniversitesi ve Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- [1] de Souza AD, Pina PS, Leão VA. Bioleaching and chemical leaching as an integrated process in the zinc industry. *Miner Eng* 2007;20:591–9.
- [2] Altundoğan, H.S.; Erdem, M.; Orhan, R.; Özer, A. Tümen F. Heavy metal pollution, potential of zinc leach residues discarded in inkur plant.
- [3] Espiari S, Rashchi F, Sadrnezhad SK. Hydrometallurgical treatment of tailings with high zinc content. *Hydrometallurgy* 2006;82:54–62.
- [4] Youcai Z, Stanforth R. Extraction of zinc from zinc ferrites by fusion with caustic soda. *Miner Eng* 2000;13:1417–21.
- [5] Raghavan R, Mohanan P., Swarnkar S. Hydrometallurgical processing of lead-bearing materials for the recovery of lead and silver as lead concentrate and lead metal. *Hydrometallurgy* 2000;58:103–16.
- [6] Miller RD. Book Review: Is Industrial Chemistry Still Presentable in Encyclopedic Form?: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 5th completely revised edition. Edited by W. Gerhartz, Y. S. Yamamoto, F. T. Campbell, R. Pfefferkorn, and J. F. Rounsaville. *Angew Chemie Int Ed English* 1986;25:763–4.
- [7] Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley; 2003.
- [8] Turan MD, Altundoğan HS, Tümen F. Recovery of zinc and lead from zinc plant residue. *Hydrometallurgy* 2004;75:169–76.
- [9] Fattahi A, Rashchi F, Abkhoshk E. Reductive leaching of zinc, cobalt and manganese from zinc plant residue. *Hydrometallurgy* 2016;161:185–92.
- [10] Ashtari P, Pourghahramani P. Selective mechanochemical alkaline leaching of zinc from zinc plant residue. *Hydrometallurgy* 2015;156:165–72.
- [11] Swarnkar SR, Gupta BL, Sekharan RD. Iron control in zinc plant residue leach solution. *Hydrometallurgy* 1996;42:21–6.
- [12] NÚñez C, Viñals J. Kinetics of leaching of zinc ferrite in aqueous hydrochloric acid solutions. *Metall Trans B* 1984;15:221–8.
- [13] Elgersma F, Kamst GF, Witkamp GJ, van Rosmalen GM. Acidic dissolution of zinc ferrite. *Hydrometallurgy*

- 1992;29:173–89.
- [14] Elgersma F, Witkamp GJ, van Rosmalen GM. Kinetics and mechanism of reductive dissolution of zinc ferrite in H<sub>2</sub>O and D<sub>2</sub>O. *Hydrometallurgy* 1993;33:165–76.
- [15] Langová Š, Leško J, Matýsek D. Selective leaching of zinc from zinc ferrite with hydrochloric acid. *Hydrometallurgy* 2009;95:179–82.
- [16] Xie F, Li H, Ma Y, Li C, Cai T, Huang Z, et al. The ultrasonically assisted metals recovery treatment of printed circuit board waste sludge by leaching separation. *J Hazard Mater* 2009;170:430–5.
- [17] Abo Atia T, Spooen J. Microwave assisted chloride leaching of zinc plant residues. *J Hazard Mater* 2020;398:122814.
- [18] Xin W, Srinivasakannan C, Xin-hui D, Jin-hui P, Da-jin Y, Shao-hua J. Leaching kinetics of zinc residues augmented with ultrasound. *Sep Purif Technol* 2013;115:66–72.
- [19] Wang Y, Jiang K, Ma H, Qin S, Zheng C. The Behavior of Zinc and Iron in Neutralized Residue During Pressure Leaching. *Mining, Metall Explor* 2022;39:847–54.
- [20] Faraji F, Golmohammadzadeh R, Sharifidarabad H, Rashchi F. An investigation of bioleaching and valorization of hazardous zinc plant purification residue using *Aspergillus niger*. *Int J Environ Sci Technol* 2023;20:8785–98.
- [21] Turan MD, Altundoğan HS, Boyrazlı M, Sarı ZA, Nizamoğlu H, Demiraslan A. Basic Leaching Behavior of Mechanically Activated Zinc Plant Residue. *Trans Indian Inst Met* 2019;72:2359–64.
- [22] Yildirim, H., Ateş, M., Turan, M. D., Sarı, Z. A., Nizamoğlu, H., & Cam A. Selective Iron Dissolution from Zinc Plant Residue. *J Mater Electron DEVICES* 2020;4:8–10.
- [23] Jha M., Kumar V, Singh R. Review of hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes. *Resour Conserv Recycl* 2001;33:1–22.
- [24] Viñals J, Núñez C, Herreros O. Kinetics of the aqueous chlorination of gold in suspended particles. *Hydrometallurgy* 1995;38:125–47.
- [25] Li Q, Zhang B, Min X, Shen W. Acid leaching kinetics of zinc plant purification residue. *Trans Nonferrous Met Soc China* 2013;23:2786–91.
- [26] Altundogan HS, Boyrazli M, Tumen F. A study on the sulphuric acid leaching of copper converter slag in the presence of dichromate. *Miner Eng* 2004;17:465–7.
- [27] Rashid K. Nadirov LAM. Copper Smelter Slag Leaching by Using H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the Presence of Dichromate. *J Chem Technol Metall* 2019;54:657–62.
- [28] Olazabal MA, Nikolaidis NP, Suib SA, Madariaga JM. Precipitation Equilibria of the Chromium(VI)/Iron(III) System and Spectroscopic Characterization of the Precipitates. *Environ Sci Technol* 1997;31:2898–902.
- [29] Baron D, Palmer CD, Stanley JT. Identification of Two Iron– Chromate Precipitates in a Cr(VI)-Contaminated Soil. *Environ Sci Technol* 1996;30:964–8.
- [30] Mussapyrova L, Nadirov R, Baláz P, Rajňák M, Bureš R, Baláz M. Selective room-temperature leaching of copper from mechanically activated copper smelter slag. *J Mater Res Technol* 2021;12:2011–25.
- [31] Kapoor ML. Production of zinc chemicals from secondary zinc. *ILZIC Q* 1994;2:57–60.
- [32] Souza AD, Pina PS, Lima EVO, da Silva CA, Leão VA. Kinetics of sulphuric acid leaching of a zinc silicate calcine. *Hydrometallurgy* 2007;89:337–45.
- [33] Rüşen A, Topçu MA. Investigation of zinc extraction from different leach residues by acid leaching. *Int J Environ Sci Technol* 2018;15:69–80.
- [34] Hollagh ARE, Alamdari EK, Moradkhani D, Salardini AA. Kinetic Analysis of Isothermal Leaching of Zinc from Zinc Plant Residue. *Int J Nonferrous Metall* 2013;02:10–20.
- [35] Eremin K, Stenger J, Khandekar N, Huang JF, Betley T, Aspuru-Guzik A, et al. Materials and Techniques of Thai Painting. *MRS Proc* 2007;1047:1047-Y06-04.
- [36] Burrafato G, Calabrese M, Cosentino A, Gueli AM, Troja SO, Zuccarello A. ColoRaman project: Raman and fluorescence spectroscopy of oil, tempera and fresco paint pigments. *J Raman Spectrosc* 2004;35:879–86.
- [37] Sari ZA, Turan MD. Investigation of atmospheric pressure leaching conditions and leaching kinetics in the obtaining of industrial copper (II) acetate solution from copper slags. *J Cent South Univ* 2023;30:2556–73.



## 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Sonrasında Betonarme Kolonlarda Enine Donatı Kusurlarının İncelenmesi

Muhammed ATAR<sup>1</sup>, Ozan İNCE<sup>2</sup>, Ömer Faruk TAŞ<sup>3\*</sup>, Alper ÖZMEN<sup>4</sup>, Erkut SAYIN<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,5</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>1</sup> matar@firat.edu.tr, <sup>2</sup> oince@firat.edu.tr, <sup>3</sup> oftas@firat.edu.tr, <sup>4</sup> alper.ozmen@inonu.edu.tr, <sup>5</sup> esayin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 27/09/2023;

Kabul/Accepted: 19/02/2024)

**Öz:** Türkiye’de bulunan bina stokunun büyük kısmını betonarme binalar oluşturmaktadır. Yıkıcı depremlerin yaşandığı Türkiye’de betonarme binaların hasar almasında beton kalitesinin düşük olması, donatı detaylarındaki hatalar, statik tasarım hataları ve zemin özelliklerinin iyi belirlenememesi gibi nedenler etkindir. Bu çalışma kapsamında 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya ilinde deprem kaynaklı hasar incelemeleri yapılmıştır. Enine donatı kusurlarından kaynaklı oluşan hasarlar incelenmiştir. İncelenen betonarme yapılarda tespit edilen enine donatı aralıklarının yetersiz olması, kolon giriş birleşim bölgelerinde enine donatı kullanılmaması veya yetersiz kullanılması, enine donatı kanca boylarının yetersiz olması ve kanca boyu açısının 135° yerine 90° olması ve çiroz kullanılmaması gibi uygulama hataları görseller ile verilmiştir. Ayrıca incelenen enine donatı uygulamalarının Türkiye Deprem Yönetmeliklerinde bulunan enine donatı kuralları ile uygunlukları değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme, deprem hasarı, enine donatı, kolon hasarı.

### Investigation of Transverse Reinforcement Defects in Reinforced Concrete Columns After the 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes

**Abstract:** The majority of the building stock in Türkiye consists of reinforced concrete buildings. In Türkiye, where destructive earthquakes are experienced, there are reasons such as low concrete quality, defects in reinforcement details, static design mistakes and poor determination of soil properties in the damage of reinforced concrete buildings. Within the scope of this study, earthquake-related damage inspections were carried out in Malatya province after the Kahramanmaraş earthquakes of February 6, 2023. Application defects such as inadequate transverse reinforcement spacing in the examined reinforced concrete structures, not using or insufficient use of transverse reinforcement in column-beam connections, insufficient hook lengths of transverse reinforcement, hook angle of 90° instead of 135°, and not using crossties are given with figures. In addition, the compatibility of the examined transverse reinforcement applications with the transverse reinforcement rules in the Turkish Earthquake Regulations were evaluated.

**Key words:** Reinforced concrete, earthquake damage, transverse reinforcement, column damage.

#### 1. Giriş

Ülkemizde nüfusun büyük çoğunluğunun şehir merkezlerine yoğunlaşması yüksek katlı binaların tercih edilmesine neden olmaktadır. Kat sayısı arttıkça binaya etki eden deprem kuvvetleri artmakta dolayısıyla tasarım ve uygulama aşamalarında daha dikkatli olunması gerekmektedir. Türkiye’de yıkıcı depremler sürekli yaşanmakta ve binaların tasarımında depremler en önemli dış tehdit olarak karşımıza çıkmaktadır.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018’e (TBDY-2018) göre betonarme bina tasarımı yapılırken, tasarım depremi etkisinde binanın hiç hasar almaması değil, hasarların kontrollü olarak ve enerji sönümleyecek şekilde olması hedeflenmektedir [1]. Betonarme binalardaki tamamen göçmelerin veya gevrek hasarların önüne geçmek için kolonların girişlerden daha güçlü tasarlanması, kolon giriş uç bölgelerinde enine donatı sıklaştırmasının yapılması gibi tasarım kuralları bulunmaktadır. Deprem sırasında betonarme elemanların eğilme kapasitelerine tam olarak ulaşabilmesi için kesme hasarı almayacak şekilde tasarımlarının yapılması gerekmektedir.

Betonarme binalarda sünek davranışın sağlanmasında enine donatılar büyük rol oynamaktadır. Kolonlarda kullanılan enine donatılar ekstenel kuvvet etkisinde, genişlemeye çalışan betonu kısıtlayarak sargı etkisi oluşturmakta ve böylece betonun dayanım ve sünekliğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Literatürde betonun sargı etkisini dikkate alan sargılı beton modelleri ve bu modeller ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [2-4]. Doğrusal

\* Sorumlu yazar: [oftas@firat.edu.tr](mailto:oftas@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7812-0086, <sup>2</sup> 0000-0002-6319-1129, <sup>3</sup> 0000-0002-1431-5316, <sup>4</sup> 0000-0003-1335-3780, <sup>5</sup> 0000-0003-0266-759X

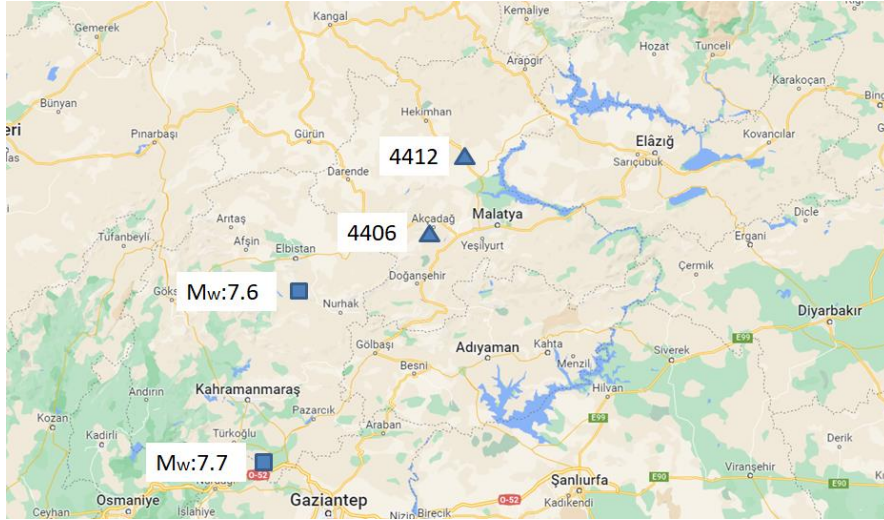
olmayan betonarme bina davranış analizlerinde betondaki sargı etkisi dikkate alındığında gerçeğe daha yakın sonuçlar alınmaktadır. Betonda oluşan sargı etkisi enine donatı aralığına, çapına, dayanımına ve enine donatı düzenine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca kolondaki eksenel yük miktarı beton davranışını etkilemektedir.

Betonarme kolonlarda kullanılan enine donatı aralıkları kolon uç bölgelerinde sıklaştırılmaktadır. Plastik mafsalların oluşabileceği bu bölgelerde etriye sıklaştırması kolon sünekliliğini ve dayanımını arttırmaktadır. Betonarme binaların depreme dayanıklı tasarımında kolon giriş birleşim bölgelerinde hasar oluşmaması hedeflenmektedir. Bu amaçla kolon enine donatılarının birleşim bölgesi içerisinde de devam ettirilmesi ve birleşim bölgelerinin dayanımının artırılması gerekmektedir. Betonarme elemanların tasarımında kullanılan enine donatılar, boyuna donatıların burkulma boylarının kısılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, enine donatıların deprem sırasında etkili olarak çalışabilmesi için kanca boylarının yeterli olması ve kanca açılarının  $135^\circ$  olması gerekmektedir. Fakat Türkiye’de yaşanan depremler sonrası betonarme binalar incelendiğinde yetersiz enine donatıdan veya hatalı enine donatı detayından kaynaklanan deprem hasarlarına sıklıkla rastlanmaktadır [5-8].

Bu çalışma kapsamında 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya ilinde bulunan betonarme çok katlı binalarda enine donatı kusurlarından kaynaklanan deprem hasarları incelenmiştir. İncelenen binalardaki enine donatı koşullarının, Türkiye Deprem Yönetmeliklerine uygunlukları değerlendirilmiştir.

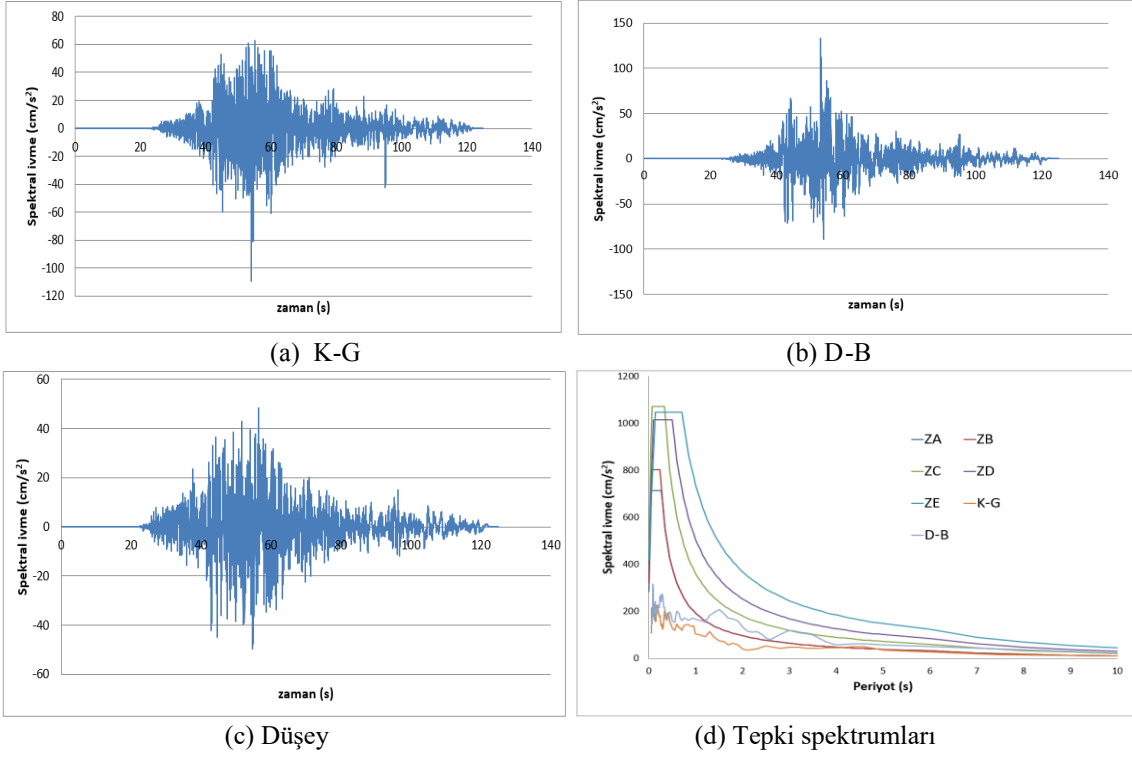
## 2. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye’de merkez üssü Pazarcık (saat 04:17, Mw: 7.7 ve 8.6 km derinlik) ve Elbistan (saat 13:24, Mw: 7.6 ve 7.0 km derinlik) olan iki yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerden sonra 6 Şubat ve 6 Mayıs tarihleri arasında 33591 deprem (büyüklüğü 0.2-6.6 arasında değişen) meydana geldiği belirtilmiştir [9]. 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde, Malatya ilinde bulunan binalarda ciddi hasarlar meydana gelmiş veya göçmeler yaşanmıştır [10]. Şekil 1’de Malatya ilinde bulunan 4406 ve 4412 numaralı istasyonların yeri ve yaşanan depremlerin merkez üstleri verilmiştir.

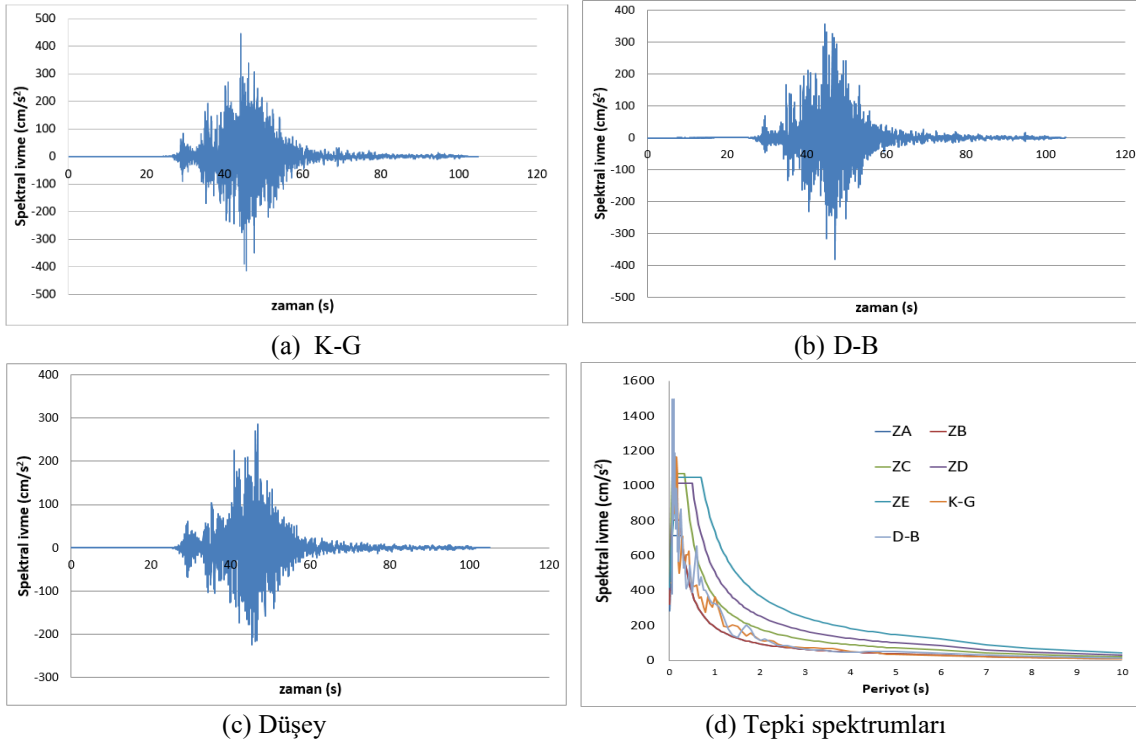


Şekil 1. Kahramanmaraş depremleri ve Malatya ilinde bulunan ivme kayıt istasyonları

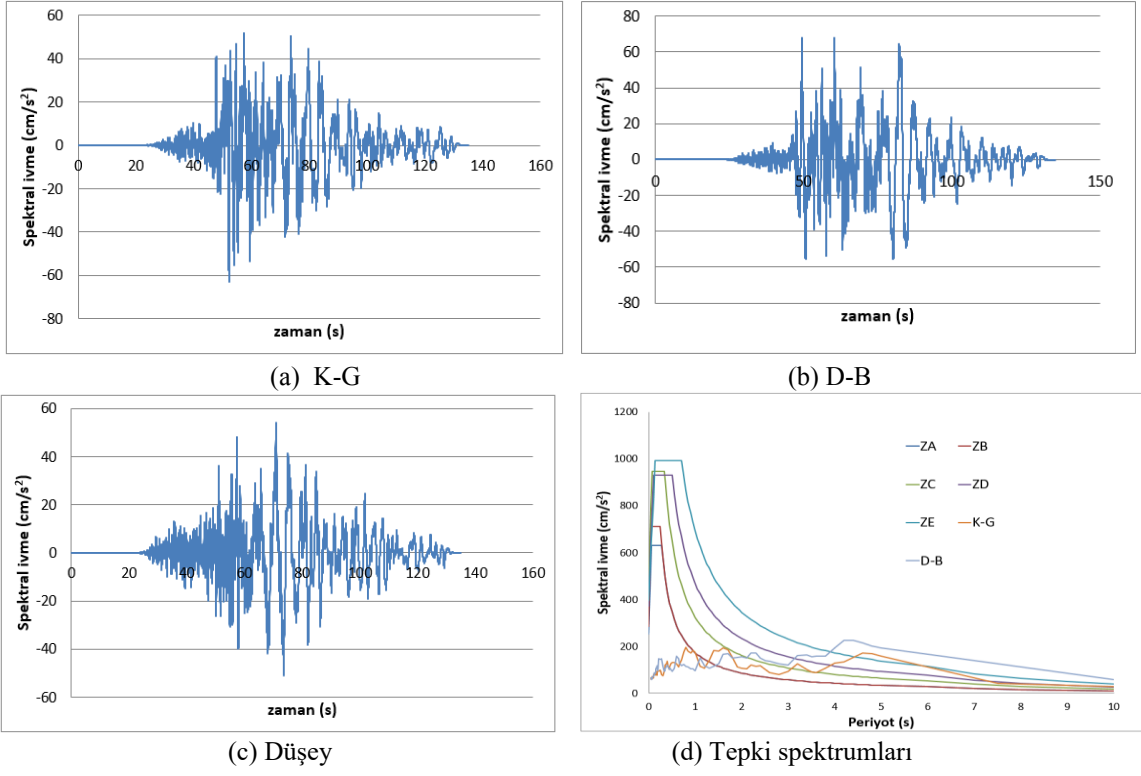
Malatya ilinde bulunan 4406 numaralı ivme kayıt istasyonuna ait Pazarcık depremi ivme kayıtları ile bu istasyondan elde edilen tepki spektrumlarının TBDY-2018 ile karşılaştırılması Şekil 2’de verilmiştir. Şekil 3’de ise Elbistan depremine ait ivme kayıtları ve tepki spektrumları verilmiştir. Tepki spektrum grafikleri incelendiğinde, 4406 numaralı istasyona ait Elbistan depremi (Mw:7.6) tepki spektrumlarının tasarım spektrumlarından büyük olduğu görülmektedir. 4412 numaralı ivme kayıt istasyonuna ait Pazarcık depremi ivme kayıtları ve tepki spektrumlarının TBDY-2018 ile karşılaştırılması ile yine aynı istasyona ait Elbistan depremi ivme kayıtları ve tepki spektrumlarının TBDY-2018 ile karşılaştırılması ise sırasıyla Şekil 4 ve 5’de verilmiştir. Şekil 2–5’de verilen grafiklerin verileri Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sisteminden alınmıştır.



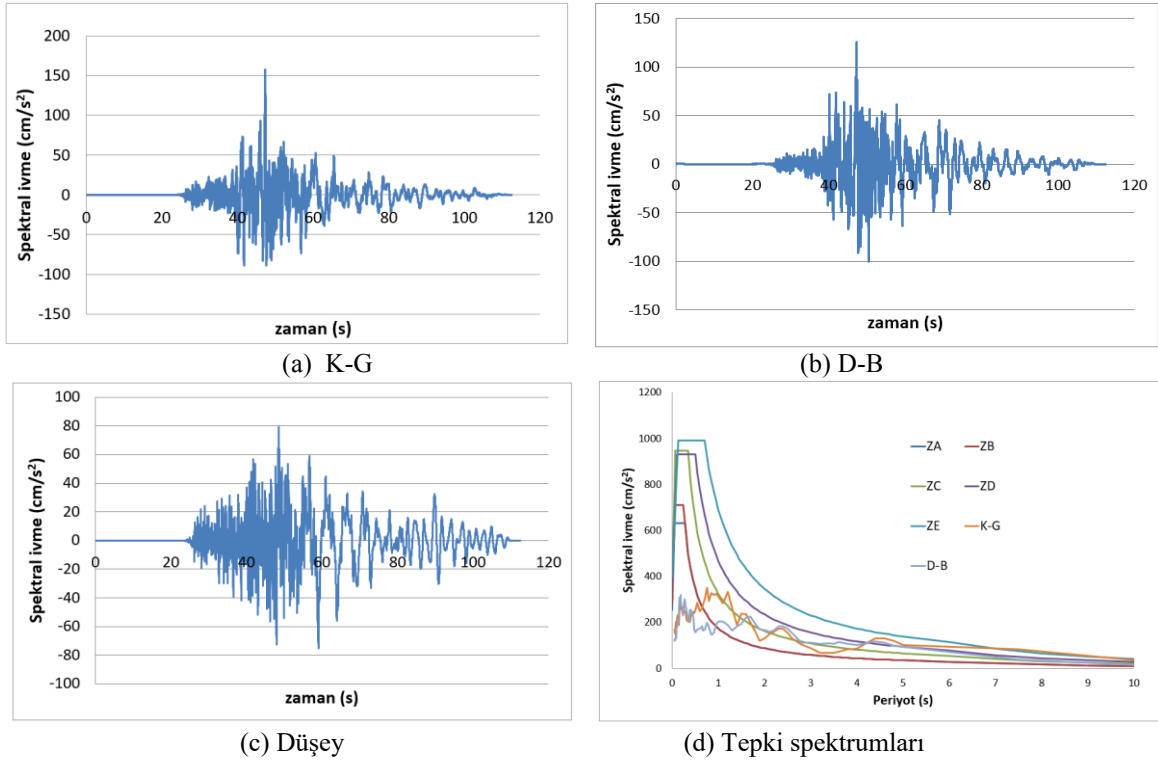
Şekil 2. 4406 ivme istasyonuna ait Pazarcık depremi kayıtları ve tepki spektrumları



Şekil 3. 4406 ivme istasyonuna ait Elbistan depremi kayıtları ve tepki spektrumları



Şekil 4. 4412 ivme istasyonuna ait Pazarcık depremi ivme kayıtları ve tepki spektrumları

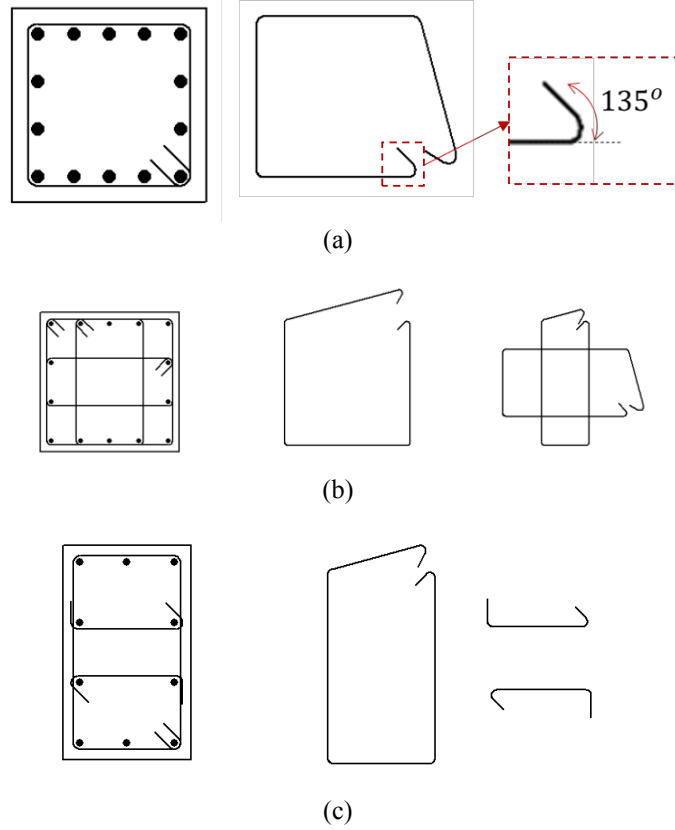


Şekil 5. 4412 ivme istasyonuna ait Elbistan depremi ivme kayıtları ve tepki spektrumları

### 3. Betonarme Kolonlarda Enine Donatı Kullanılması

Betonarme elemanların kesme kuvvet dayanımlarının artırılması için enine donatılar (etriyeler) kullanılmaktadır. Ayrıca enine donatılar, betonda sargı etkisi oluşturarak beton dayanımını ve sünekliliğini artırmakta, boyuna donatıların burkulma boylarını kısaltmaktadır.

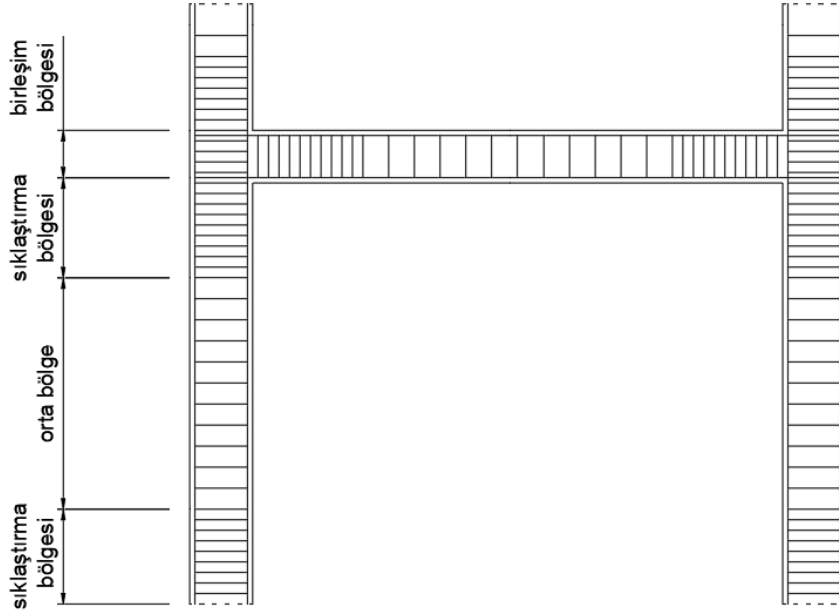
TBDY-2018'e göre enine donatı kolları arası mesafenin enine donatı çapının 25 katından fazla olmaması gerekmektedir. Bu durumun sağlanması için enine donatılar çirozlarla veya farklı enine donatı düzenleri ile bağlanabilirler. Ayrıca dairesel kolonlarda etriyeler belirli aralıklarla atılmak yerine sürekli fret olarak da tasarlanabilirler. Farklı etriye düzenleri Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Örnek enine donatı düzenleri (enine donatı kanca açıları  $135^\circ$  olarak tasarlanmalıdır)

#### 3.1. Türkiye deprem yönetmeliklerinde enine donatı kuralları

Türkiye'de uygulanan deprem yönetmeliklerinde betonarme elemanların tasarımında etriye kuralları üç bölge dikkate alınarak belirtilmiştir [1, 11-13]. Taşıyıcı elemanların birleşimlerine yakın bölgelerinde sıklaştırma bölgesi tanımlanmış ve bu bölgelerde enine donatı aralıkları azaltılmıştır. Ayrıca kolon giriş birleşim bölgesi içerisinde kolon enine donatılarının devam ettirilmesi gerekmektedir (Şekil 7). Tablo 1'de Türkiye Deprem Yönetmeliklerinde yer alan enine donatı aralıkları özetlenmiştir. Tabloda,  $h$ : kolon uzun kenar uzunluğunu,  $b$ : kolon kısa kenar uzunluğunu,  $H_{net}$ , kolon net yüksekliğini,  $\emptyset$  ise boyuna donatı çapını ifade etmektedir. Kolon sıklaştırma bölgesi uzunluğu için Tablo 1'de belirtilen en büyük değerin, enine donatı aralıkları için ise küçük değerin kullanılması gerekmektedir.



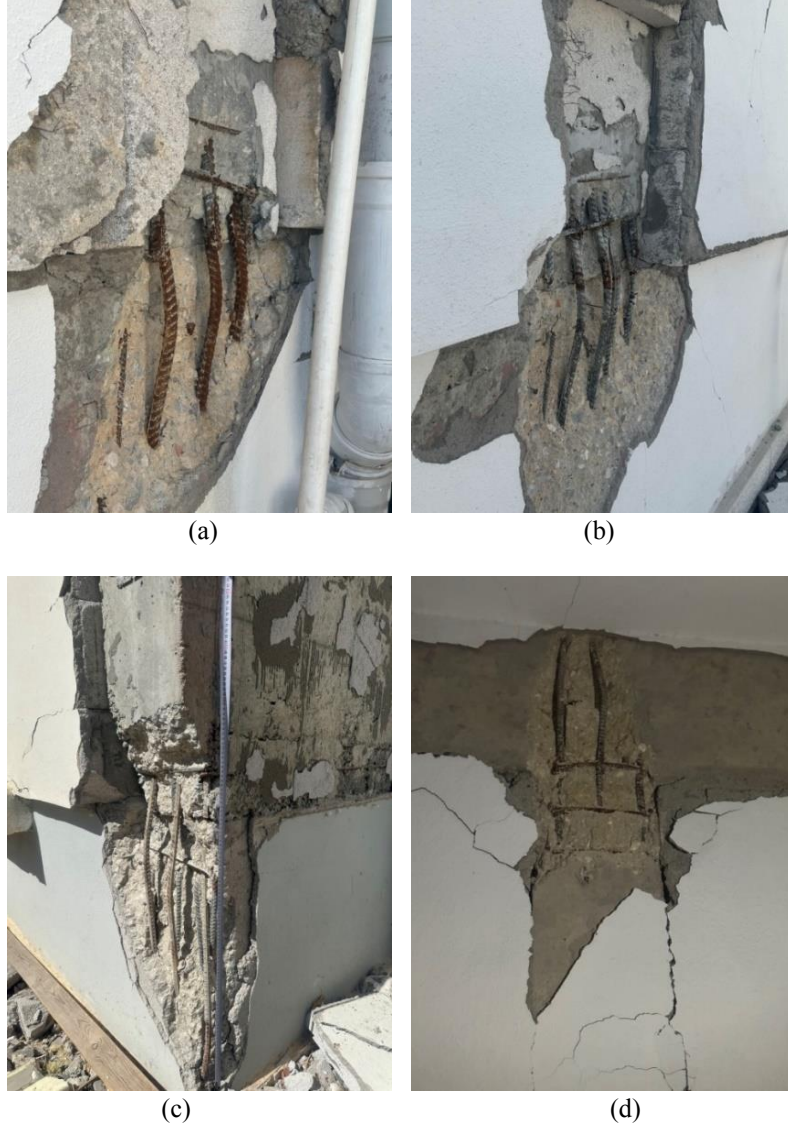
Şekil 7. Betonarme çerçevelerde etriye kullanım bölgeleri

Tablo 1. Türkiye Deprem Yönetmeliklerinde enine donatı kuralları

Yönetmelik	Kolon sıklaştırma bölgesi uzunluğu	Sıklaştırma bölgesi enine donatı aralığı	Orta bölge enine donatı aralığı	Birleşim bölgesi donatı aralığı
1975	$h; H_{net}/6; 45 \text{ cm}$	10 cm	$h/2; 20 \text{ cm}; 12\emptyset$	$h/2; 20 \text{ cm}; 12\emptyset$
1998	$h; H_{net}/6; 50 \text{ cm}$	10 cm; $b/3$	$b/2; 20 \text{ cm}$	10 cm (kuşatılmamış kolon)- 15 cm (kuşatılmış kolon)
2007	$h; H_{net}/6; 50 \text{ cm}$	10 cm; $b/3$	$b/2; 20 \text{ cm}$	10 cm (kuşatılmamış kolon)- 15 cm (kuşatılmış kolon)
2018	$1.5h; H_{net}/6; 50 \text{ cm}$	15 cm; $b/3; 6\emptyset$	$b/2; 20 \text{ cm}$	10 cm (kuşatılmamış kolon)- 15 cm (kuşatılmış kolon)

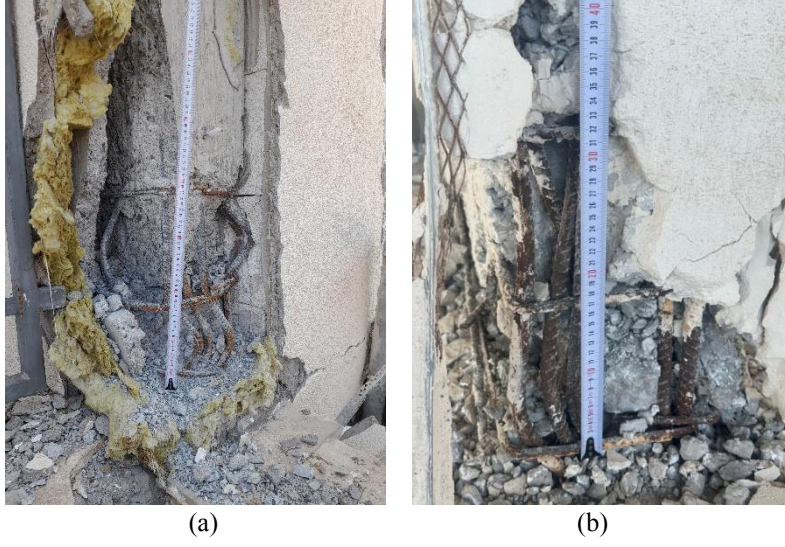
#### 4. Enine Donatı Yetersizliğinden Kaynaklanan Deprem Hasarları

Kolonlar içerisinde kullanılan enine donatıların birleşim bölgesi içerisinde devam ettirilmesi gerekmektedir [1, 11-13]. Fakat yapılan saha incelemelerinde bu kurala uyulmadığı yaygın olarak gözlemlenmiştir. Birleşim bölgesi içerisinde enine donatı olmaması bu bölgede bulunan boyuna donatıları burkulmaya zorlamakta ve dayanımı ciddi ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca, saha incelemelerinde birleşim bölgelerinde etriye aralığının 90 cm'ye kadar çıktığı gözlemlenmiştir (Şekil 8).



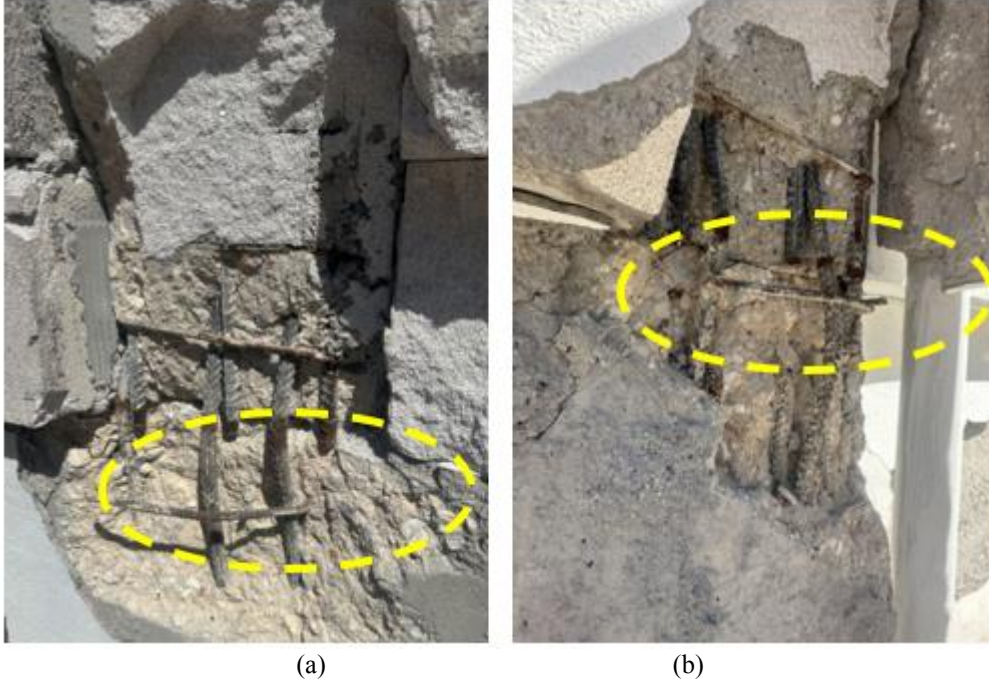
Şekil 8. Birleşim bölgesi içerisinde enine donatı kullanılmaması

Deprem sırasında kolon uçlarında meydana gelen momentler artmakta ve plastik mafsallı bölgeleri olarak adlandırılan bu bölgelerde hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle Türkiye Deprem Yönetmeliklerinde sıklaştırma bölgesi boyunca etriye sayısı artırılarak kolonların dayanımının ve sünekliliğinin artırılması hedeflenmektedir. Fakat yapılan saha incelemelerinde kolonlarda sıklaştırma yapılmadığı yaygın olarak gözlemlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Kolonlarda yetersiz enine donatı aralığı

Kolon enine donatılarının yetersiz olması durumunda, enine donatılar donatı burkulmasını engelleyememekte ve Şekil 10’ da görüldüğü gibi enine donatılarda kopma meydana gelebilmektedir.



Şekil 10. Enine donatıda kopma durumu

Enine donatıların etkili olarak çalışabilmesi için kanca boylarının yeterli olması ve kanca açılarının  $135^\circ$  olması gerekmektedir. Şekil 11’de kısa kolon etkisiyle kesme hasarı alan bir kolonda, etriye kanca açılarının  $90^\circ$  olması nedeniyle enine donatıların açıldığı görülmektedir.





Şekil 11. 90° kanca açısına sahip kolon enine donatılarında açılma

Türkiye Deprem Yönetmeliklerinde etriye kolları arası mesafe sınırlandırılmıştır (etriye çapının 25 katı). Etriye kolları arası mesafenin fazla olması durumunda etriye düzeni değiştirilmeli veya çirozlar kullanılmalıdır. Fakat saha incelemelerinde etriyelerin sadece kolon etrafında bulunduğu yani uygun olmayan etriye düzenleri yaygın olarak gözlemlenmiştir (Şekil 12).



Şekil 12. Enine donatı kolları arası mesafenin yetersiz olması

## 5. Sonuçlar

Türkiye’de 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş merkezli iki deprem (Mw: 7.7 ve Mw: 7.6) meydana gelmiş ve bu depremler betonarme yapıların ciddi hasarlar almasına veya göçmesine neden olmuştur. Yaşanan bu yıkıcı depremlerin Malatya ili üzerine etkisi incelendiğinde, Elbistan depreminin daha fazla etkili olduğu görülmektedir. Bu çalışma kapsamında, Malatya ili özelinde betonarme yapıların detaylı incelenmesi yapılmış ve imalat kusurları dikkate alınmıştır. İnceleme sonucu betonarme binaların hasar alma nedenleri arasında olan enine donatı yetersizlikleri ve uygulama hataları ile yaygın olarak karşılaşmıştır. Özellikle kolon kiriş birleşim bölgesi

içerisinde enine donatı bulunmaması veya kolonlarda etriye sıklaştırılmasının yapılmaması nedeniyle boyuna donatıların burkulması ve kabuk betonunun dökülmesi gözlemlenmiştir. Ayrıca enine donatı kancalarının yetersiz boyda olması veya kanca açılarının  $135^\circ$  olarak yapılmaması nedeniyle, enine donatılarda açılma görülmüştür. Ayrıca Türkiye Deprem yönetmeliklerinde yer alan çirozların kullanılmadıkları, başka bir ifade ile etriye kol aralıklarının yetersiz olduğu görülmüştür. Depreme dayanıklı bina tasarımı için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde verilen enine donatı kurallarına özellikle uygulama aşamasında daha fazla dikkat edilmesi ve yukarıda bahsedilen kusurlardan kaçınılması büyük önem arz etmektedir.

### Kaynaklar

- [1] TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
- [2] Saatcioglu M., Razvi S. R. Strength and ductility of confined concrete. *Journal of Structural Engineering* 1992; 118(6): 1590-1607.
- [3] Mander J. B., Priestley M. J., Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering* 1988; 114(8): 1804-1826.
- [4] 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.
- [5] Doğangün A. Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Türkiye. *Engineering Structures* 2004; 26(6): 841-856.
- [6] Taşkın B., Sezen A., Tugsal U. M., Erken A. The aftermath of 2011 Van earthquakes: evaluation of strong motion, geotechnical and structural issues. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2013; 11(1): 285-312.
- [7] 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.
- [8] İnce O. Structural damage assessment of reinforced concrete buildings in Adıyaman after Kahramanmaraş (Türkiye) Earthquakes on 6 February 2023. *Engineering Failure Analysis* 2024; 156, 107799.
- [9] Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 06 Şubat 2023 Pazarcık-Elbistan Kahramanmaraş (Mw: 7.7 – Mw: 7.6) Depremleri Raporu, 2023.
- [10] Atar M., İnce O., Taş Ö.F., Özmen A., Sayın E. Betonarme prefabrik endüstri yapılarının 6 Şubat 2023 depremleri sonrası hasarlarının incelenmesi. *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 2023; 5(2): 291-300.
- [11] ABYBHY-1975, Afet Bölgelerine Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, İmar ve İskân Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- [12] ABYBHY-1998, Afet Bölgelerine Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Türkiye.
- [13] DBYBHY-2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

## Sakkarozun Enzimatik Olarak Hidrolizinin Optimizasyonu

Abdulkadir GÜL<sup>1\*</sup>, Muhammet Şaban TANYILDIZI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Genetik ve Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye

<sup>2</sup> Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> kadirgul@gumushane.edu.tr, <sup>2</sup> mtanyildizi@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 23/09/2023;

Kabul/Accepted: 19/02/2024)

**Öz:** Nişasta kaynaklı glukoz şurupları endüstriyel uygulamalarda geniş bir paya sahip olmasına rağmen temelde sağlıkla ilgili tartışmalar tüketicilerde sakkarozun kullanımını öne çıkarmaktadır. Sakkaroz, asitleştirme veya enzimatik yöntemlerle invert şekerler adı verilen glukoz ve fruktoz monomerlerine hidroliz edilebilirler. Bu yöntemlerden enzimatik hidroliz işlemi geleneksel kimyasal proseslere göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi ve daha az toksik atık üretmesinden dolayı endüstride tercih edilen bir yöntemdir. Bununla birlikte, hidroliz işleminde kullanılan enzimler genellikle yeniden kullanımı zor ve stabilitesi düşük moleküller olup, üretim maliyetlerinin yüksek olması endüstriyel ölçekte uygulanmasını zorlaştırmaktadır. Bu çalışmanın amacı sakkarozun invertaz enzimi yardımıyla hidrolizinde önemli olan bağımsız değişkenlerin sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu üzerine etkisinin Merkez Kompozit Dizayn (MKD) deneysel tasarım yöntemi kullanılarak detaylı olarak belirlenmesidir. MKD ile gerçekleştirilen deneylerde incelenen bağımsız değişkenler ve cevap değişkenleri arasında enzim aktivitesini de içeren model bir denklem oluşturulmuştur. Bağımsız değişkenlerin incelenen aralıkları içerisinde, matematiksel model ifadenin hem indirgen şeker konsantrasyonu hem de dönüşümün maksimum olduğu şartlar için yapılan optimizasyon işlemi sonucunda; sakkaroz konsantrasyonu 190,16 g/L, enzim aktivitesi 55,36 U/mL, sıcaklık 33,46 °C, reaksiyon süresi 131,10 dk ve karıştırma hızı 120,86 rpm olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, sakkarozun enzimatik hidrolizi için verimli çalışma koşulları belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** İvertaz enzimi, hidroliz verimi, optimizasyon, sakkaroz dönüşüm oranı.

### Optimization of Enzymatic Hydrolysis of Sucrose

**Abstract:** Although starch-derived glucose syrups have a wide share in industrial applications, health-related discussions mainly highlight the use of sucrose by consumers. Sucrose can be hydrolyzed by acidification or enzymatic methods to form glucose and fructose monomers, called invert sugars. Among these methods, enzymatic hydrolysis process is a preferred method in the industry because it occurs at lower temperatures and produces less toxic waste compared to traditional chemical processes. However, the enzymes used in the hydrolysis process are generally molecules that are difficult to reuse and have low stability, and their high production costs make it difficult to apply them on an industrial scale. The aim of this study was to determine in detail the effect of the independent variables that are important in the hydrolysis of sucrose by the invertase enzyme on sucrose conversion rate, hydrolysis efficiency, and total reducing sugar concentration using the Central Composite Design (CCD) experimental design method. A model equation including enzyme activity was established between the independent variables and response variables examined in the experiments performed with MKD. Within the examined ranges of the independent variables, as a result of the optimization process for the conditions where both the reducing sugar concentration and the conversion of the mathematical model expression are maximum; sucrose concentration was determined as 190.16 g/L, enzyme activity as 55.36 U/mL, temperature as 33.46 °C, reaction time as 131.10 min, and mixing speed as 120.86 rpm. As a result, efficient processing conditions for the enzymatic hydrolysis of sucrose were determined.

**Keywords:** Invertase enzyme, hydrolysis yield, optimization, sucrose conversion rate.

#### 1. Giriş

Şekerler modern beslenmenin önemli bir bileşenidir ve sadece birçok meyve, sebze ve yemişlerde doğal olarak bulunan miktarlarla değil, aynı zamanda işlenmiş yiyecek ve içeceklere eklenen tatlandırıcılar olarak da uygulama bulmaktadır. Ayrıca, besinlere metabolize edilebilir enerji kattıklarından dolayı bunlara ‘kalorili’ veya ‘besleyici’ tatlandırıcılar da denir [1]. Yaklaşık %70’i şeker kamışından, geri kalan %30’u ise şeker pancarından üretilen sakkaroz en önemli bir şeker türüdür [2]. Sakkaroz, glikozil alt ünitesindeki C1 (hemiasetal) ile fruktozil ünitesindeki C2 (hemiketal) arasında bir eter bağıyla (yani glikozidik bağ) bağlanan [3] ve su moleküllerinin açığa çıkmasıyla glukoz ve fruktoz moleküllerinden oluşan bir disakkarittir [4]. Ayrıca, sakkaroz birçok alanda

\* Sorumlu yazar: [kadirgul@gumushane.edu.tr](mailto:kadirgul@gumushane.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4879-6194, <sup>2</sup> 0000-0001-6456-1593

hammadde olarak kullanılabilen ve kolayca bulunabilen en ucuz karbon kaynaklarından biridir [5]. Sakkaroz, glukoz ve fruktoz esaslı mısır şurupları gibi farklı hammadde kaynaklarına göre daha ekonomik olduğu ifade edilmektedir [6-8]. Yiyecek ve içecek endüstrisinde genellikle tatlandırıcı olarak kullanılan sakkaroz ayrıca önemli bir biyoyakıt olan etanolün dışında 5-Hidroksimetil furfural (HMF), biyodizel ve levülinik asit gibi diğer biyoyakıtların/yeşil kimyasalların üretimi için bir hammadde olarak da kullanılmaktadır [9].

Sakkaroz, yüksek sıcaklıklarda asit ilavesi ile asidik veya ılımlı koşullarda invertaz enzimi yardımıyla enzimatik olarak hidrolize edilebilir [10]. Enzim bazlı proseslerin geleneksel kimyasal proseslere göre daha düşük sıcaklıklarda (30-40 °C civarında) çalıştığı, daha az toksik atık ürettiği ve çok daha az yan ürün içerdiği bilinmektedir [11]. İvertaz veya  $\beta$ -fruktofuranosidaz (EC.3.2.1.26) enzimi, sakkarozun monomerlerine parçalanmasını katalize eden hidrolitik bir enzimdir [12]. İvertaz enzimi geniş bir pH aralığında (3,5-5,5) nispeten yüksek aktivite sergilemekle birlikte optimum pH'sı 4,5'e yakındır. Genel olarak invertaz enzim aktivitesi 55°C civarında maksimuma ulaşır. İvertaz enzimi, ağır metaller tarafından güçlü bir şekilde inhibe edilebilir [13]. Sakkaroz invertaz enzimiyle hidroliz edildiğinde başlangıçta hazırlandığı konsantrasyondan daha düşük (yaklaşık %10) konsantrasyonlarda invert şeker olarak bilinen glukoz ve fruktozun eşmolar bir karışımı oluşur [14, 15]. Bu invert şekerlerden biri olan fruktoz, sakkarozdan daha tatlıdır ve yiyecek ve içecek endüstrisinde tatlandırıcı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [16]. Bu ekstra tatlılık (invert şurup), meyve aromalı içeceklerde kullanılan karbonhidrat tatlandırıcılarının miktarına yaklaşık %20 daha az ihtiyaç duyulmasına ve dolayısıyla daha uygun bir maliyet etkinliğine yol açabilmektedir [17, 18]. İvert şekerler, kremler, reçeller, yapay bal ve sıvı şeker üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Fruktoz ayrıca biyoyakıtlar ve biyodizelin yanı sıra dimetilfuran (DMF), 5-etoksümetilfurfural (EMF), HMF ve 2,5-furandikarboksilik asidi (FDCA) üretmek için hammadde olarak da tercih edilmektedir [9]. Bununla birlikte, fruktozun yüksek fiyatı bu değerli ürünlerin üretiminde önemli bir dezavantajdır. Glukoz ise gıdaların birçoğunda bulunmasının yanı sıra insan ve enerji metabolizmasının düzenlenmesinde de merkezi bir rol oynar [1]. Ayrıca, farmasötikler, deterjanlar, betonlar, biyolojik olarak parçalanabilen polimerler ve gıda endüstrilerinde yaygın uygulamaları olan glukonik asit (GA) üretmek için temel hammadde kaynağı olarak da kullanılmaktadır [20, 21]. Glukoz GA'nın dışında, naylon, plastik ve gıda katkı maddelerinin üretimi için önemli kimyasallar olan glukuronik asit ve türevlerine de oksitlenebildiği farklı çalışmalardan bilinmektedir [22]. Glukozun bu değerli ürünlerinde üretimlerinde kullanılması yüksek girdi maliyetlerinden dolayı farklı hammadde arayışlarına neden olmaktadır [23].

Sakkaroz ayrıca invert şeker üretmek için asidik ortamda (pH 2-3) yüksek sıcaklıklarda da (70-85 °C) hidroliz edilebilir. Ancak asit hidrolizi, istenmeyen ürün oluşumu, yüksek enerji tüketimi, düşük verim ve ekipmanın yüksek korozyif eğilimi gibi dezavantajlara sahiptir [24]. Enzimatik olarak sakkarozun hidrolizi, hidroliz reaksiyonunun daha ılımlı sıcaklık ve pH koşulları altında gerçekleştirilmesi [24] ve daha yüksek kalitede invert şekerlerin elde edilmesi nedeniyle asit hidrolizine göre daha fazla kullanılan bir yöntemdir [25, 26]. Ayrıca, asit hidrolizi ile elde edilen renkli hidroliz ürünlerinin aksine enzimatik hidroliz ürünlerinin rensiz olma avantajı da bulunmaktadır [25, 27]. Bu durum, enzimatik hidroliz işlemini özellikle yiyecek ve içecek endüstrisindeki uygulamalarda tercih edilir hale getirmektedir [26]. Özetle, sakkarozun hidrolizinde enzimatik hidroliz işlemi, asidik hidroliz yöntemleri gibi geleneksel tekniklerden daha verimli bir yöntemdir [4]. Bununla birlikte, kullanılan enzimlerin yeniden kullanımının zor, stabilitesinin düşük ve üretim maliyetinin yüksek olması, bunların endüstriyel ölçekte uygulanmasını zorlaştırmaktadır [28]. Ayrıca, kullanılan biyokütle kaynağının maliyeti de endüstriyel üretimlerde önemli bir girdi kalemidir. Bu kapsamda çalışmanın amacı, doğada farklı bitkisel maddelerden bol miktarlarda elde edilebilen ve kısmen daha uygun maliyetli sakkarozun invertaz enzimi yardımıyla hidrolizinin optimize edilmesidir. Sakkarozun invertaz enzimiyle hidrolizi [29, 30] uzun zamandır bilinen ve buna yönelik gerçekleştirilen birçok çalışma olmasına rağmen, substrat kaynağı olarak sakkarozun ticari olarak temin edilen invertaz enzimi yardımıyla hidroliz şartlarının optimizasyonunu ve etkisini ortaya koyan modellemesinin yapıldığı bir çalışma bilgimize göre literatürde bulunmamaktadır.

Sakkarozun enzimatik olarak hidroliz verimi, inkübasyon süresi, sıcaklık ve karıştırma hızı gibi çevresel koşulların yanı sıra kullanılan enzimin aktivitesi ve sakkaroz konsantrasyonunun optimize edilmesiyle artırılabilir. Optimize edilmiş şartlar hidroliz verimini artırır ve üretim maliyetlerini de azaltır. Geleneksel optimizasyon yöntemleri zahmetli ve zaman alıcıdır. Ayrıca bu yöntemler uygulanırken değişkenler arasındaki etkileşimler dikkate alınmaz. Proses optimizasyonuna alternatif bir yaklaşım, proses optimizasyonu için birden fazla faktörü aynı anda inceleyebilen, Merkez Kompozit Dizaynı (MKD) adı verilen istatistiksel yöntemdir. İstatistiksel optimizasyon ile uygun şekilde planlanmış bir dizi deney yalnızca zaman kaybını ve üretim maliyetlerini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda söz konusu değişkenlerin etkileşimleri de dahil olmak üzere optimum değerlerin belirlenmesine de yardımcı olur [31]. Sonuç olarak, bu çalışmada, enzimatik hidroliz, sakkaroz biyokütlesinden glukoz ve fruktozun elde edildiği temel proseslerden biri olduğundan hidroliz prosesinin optimize edilmesiyle

indirgen şeker üretim veriminin artırılması ve üretim maliyetlerinin azaltılmasını sağlayacak model denklemin elde edilmesi hedeflenmiştir.

## 2. Materyal ve Metotlar

### 2.1 Deneyleerde kullanılan cihazlar ve kimyasallar

Çalışmada %99,5 saflıktaki ticari olarak temin edilen sakkaroz, enzimatik hidroliz deneylerinde substrat kaynağı olarak kullanılmıştır. Sakkarozun hidrolizinde ticari olarak temin edilen Alfaol NT100 marka invertaz ( $\beta$ -fruktofuranozidaz, E.C 3.2.1.26) enzimi kullanılmıştır. Tampon çözeltilerin hazırlanmasında sodyum asetat trihidrat ( $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) (Tekkim, TK.170500.01002) ve pH'sının ayarlanmasında hidroklorik asit (HCl) (Merck, 1.00314.2500) kimyasalları kullanılmıştır. Tampon çözeltilerin pH değerleri Thermo Scientific marka pH metre kullanılarak ölçülmüştür. İvertaz enzim aktivitesi deneylerinde inkübasyon işlemleri Wisebath markalı su banyosunda gerçekleştirilmiştir. Sakkarozun enzimatik hidrolizi işleminde karıştırıcı olarak Selecta marka çalkalayıcı kullanılmıştır. İvertaz enzim aktivitesi ve hidroliz ortamında bulunan şekerlerin (sakkaroz, glukoz ve fruktoz) analizleri için Yüksek Basınçlı Sıvı Kromatografisi (HPLC, Shimadzu marka, LC-20AT) kullanılmıştır.

### 2.2 İvertaz enzim aktivitesinin belirlenmesi

Deneysel tasarımda bağımsız değişken olarak tanımlanan invertaz enzim aktivitesi 'Creative Enzymes: Enzymatic Assay of invertase [32]' protokolü takip edilerek ölçülmüştür. İlk olarak, 100 mM sodyum asetat tampon çözeltisi (25 °C, pH 4,6), 200 mL distile suda  $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  kimyasalının çözdürülüp, 1 M HCl ile pH'nın 4,6 ya ayarlanmasıyla hazırlanmıştır. Daha sonra, invertaz enzimi aktivite deneylerinde kullanılmak üzere distile su yardımıyla 10 kat seyreltilerek enzim çözeltisi hazırlanmıştır. Enzim çözeltisi hazırlandıktan sonra, %99,5 saflıktaki sakkaroz kullanılarak konsantrasyonu 200 g/L olacak şekilde substrat çözeltisi hazırlanmıştır. 0,5 M 100 mL HCl çözeltisi deney sonunda enzim aktivitesini durdurmak için kullanılmıştır. Aktivite tayini için gerekli tüm malzemeler hazırlandıktan sonra 2 mL'lik küvet içerisine sırasıyla 1 mL tampon, 0,5 mL substrat ve son olarak 0,1 mL enzim çözeltisi eklenerek 37 °C'lik bir su banyosunda 5 dk boyunca inkübasyona bırakılmıştır. Bu sürenin sonunda 0,1 mL HCl çözeltisi ile reaksiyon durdurulmuştur. Numuneler 0. saatten başlayarak belirli sürelerde HPLC ile analiz edilerek her bir sürenin sonundaki sakkaroz, glukoz ve fruktoz konsantrasyonları belirlenmiştir. Son olarak elde edilen sonuçlar kullanılarak aşağıda verilen Denklem 1 yardımıyla invertaz enziminin aktivitesi hesaplanmıştır. İvertaz enziminin aktivitesi belirlendikten sonra tasarımdaki enzim miktarına denk gelecek şekilde gerekli hacimdeki enzim hidroliz ortamına eklenmiştir. Bir ünite (U) değeri, 25 °C'de dakikada sakkarozdan 1  $\mu\text{mol}$  glukoz eşdeğer indirgen şeker salınımını katalizleyen enzim miktarı olarak tanımlanmıştır. Enzimatik aktivite değeri sakkaroz çözeltisi için U/mL olarak ifade edilmiştir [33, 34].

$$U/mL = \frac{\mu\text{mol glukoz}}{\text{mL enzim} \times \text{dakika}} \times (\text{seyreltme oranı}) \quad (1)$$

### 2.3 Sakkarozun enzimatik hidrolizi ve optimizasyon çalışmaları

Sakkarozun invertaz enzimi yardımıyla hidroliz edilmesi deneylerinde %99,5 saflıktaki sakkaroz substrat kaynağı olarak kullanılmıştır. Sakkarozun enzimatik hidrolizi için enzim aktivitesi, substrat konsantrasyonu, sıcaklık, süre ve karıştırma hızı gibi bağımsız değişkenlerin en uygun değerleri deneysel tasarım ile belirlenmiştir. Deneysel çalışma şablonu MKD'ye göre tasarlanmış ve Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1 yardımıyla farklı konsantrasyonlardaki sakkaroz çözeltileri hazırlanarak 250 mL'lik erlenlere 50 mL sıvı hacmi olacak şekilde ayrılmıştır. Her bir erlene belirlenen miktarlarda enzim eklendikten sonra farklı sıcaklık, süre ve karıştırma hızlarında sakkarozun enzimatik hidrolizi işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda, sakkaroz, glukoz ve fruktoz miktarları HPLC kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonrasında istatistiksel analizler DesignExpert 8.0® (State-Ease, USA) yazılımı yardımıyla incelenerek en uygun hidroliz şartları belirlenmiştir. Cevap değişkenleri olarak sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu seçilmiş ve aşağıda verilen Denklem 2, 3 ve 4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Sakkaroz dönüşüm oranı (\%)} = \frac{C_{\text{başlangıç sakkaroz}} - C_{\text{kalan sakkaroz}}}{C_{\text{başlangıç sakkaroz}}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Hidroliz verimi (g/g)} = \frac{C_{\text{glukoz}} + C_{\text{fruktoz}}}{C_{\text{başlangıç}}} \quad (3)$$

$$\text{Toplam indirgen şeker konsantrasyonu (g/L)} = C_{\text{glukoz}} + C_{\text{fruktoz}} \quad (4)$$

**Tablo 1.** Enzimatik hidroliz için en uygun şartların belirlenmesi amacıyla seçilen değişkenler ve incelenen aralık değerleri.

Bağımsız değişkenler	- $\alpha$	0	+ $\alpha$
Sakkaroz konsantrasyonu, g/L	50	200,0	350
Enzim aktivitesi, U/mL	10	42,5	75
Sıcaklık, °C	20	30,0	40
Reaksiyon süresi, dk	15	97,5	180
Karıştırma hızı, rpm	30	115,0	200

## 2.4 Analizler

Çalışma boyunca gerçekleştirilen tüm deneysel çalışmalar, iki paralel numune ile gerçekleştirilmiş ve bunların ortalaması deneysel sonuç olarak kullanılmıştır. Numune analizleri ölçülen iki numune değeri arasındaki bağıl hata %10'dan fazla olduğunda tekrarlanmıştır. Çalışmada, optimizasyon işlemlerinde MKD deneysel tasarım metodundan faydalanılmıştır. Bu araştırma yöntemiyle, farklı cevap değişkenlerini (sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu) dikkate alarak optimizasyon yapılmasına imkân sağlayacak model ifadeler elde edilmiştir. Elde edilen bu model denklemlerin ANOVA (Analysis of Variance) test sonuçları incelenmiştir. Önerilen model denklemin sayısal çözümlene yöntemi yardımıyla farklı cevap değişkenleri için çözümlü yapılmış ve belirlenen optimum noktalarda doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarımın oluşturulması ve sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve model ifadenin çözümlenmesi işlemlerinde DesignExpert 8.0® (Stat-Ease Inc. Version 8.0) yazılımından faydalanılmıştır.

Deneysel çalışma sürecinde, ortamda bulunan glukoz, fruktoz ve sakkaroz gibi şekerlerin miktarları HPLC ile ICE-Coregel-87H3 HPLC kolonu ve 5 mM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> mobil fazı kullanılarak analiz edilmiştir. Enzim aktivite belirlenme ve hidroliz deneylerinde ortamda bulunan şeker miktarları Refraktif Index Dedektörü (RID) ile analiz edilmiştir. Akış hızı 0,6 mL/dk olup kolon sıcaklığı 30 °C'ye ayarlanmıştır. Analiz süresi her bir örnek için toplam 25 dk olarak belirlenmiştir. Enzim aktivitesi belirlenme ve hidroliz ortamı numuneleri, 50 kat oranlarda seyreltilerek, 0,45 µm'lik polipropilen filtreler yardımıyla filtreleme işlemi yapıldıktan sonra içerdiği şeker miktarları tespit edilmiştir.

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1 Sakkarozun enzimatik hidrolizi için optimizasyon sonuçları

Sakkarozun hidrolizi, asidik veya enzimatik olarak gerçekleştirilebilir. Kullanılan asit çevreyi kirlenmesinin yanında ekipman için korozif etkiye sahip olması ve yan ürünlerin oluşması gibi dezavantajlara sahiptir. Yüksek özgülük ve afinitye sahip enzimatik işlem çok daha ılımlı şartlarda gerçekleşen bir reaksiyondur ve yan ürün oluşumunun olmaması enzimatik yöntemin önemli avantajlarıdır [35].

Bu çalışmada, sakkarozun hidrolizi için ticari invertaz enziminin en uygun hidroliz şartları araştırılmıştır. Sakkarozun enzimatik hidrolizinde önemli olan değişkenlerin, sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu üzerine etkisinin detaylı olarak belirlenmesi amacıyla MKD yardımıyla oluşturulan deneysel çalışma tablosu ve elde edilen deneysel sonuçlar Tablo 2'de görülmektedir.

**Tablo 2.** Sakkaroz dönüşüm oranı, hidrolizi verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu için MKD tasarım matrisi ve deneysel sonuçlar.

Deney no	Sakkaroz konst., g/L	Enzim aktivitesi, U/mL	Sıcaklık, °C	Süre, dk	Karıştırma hızı, rpm	Sakkaroz dönüşüm oranı, %	Hidroliz verimi, g/g	Toplam indirgen şeker konst., g/L
1	136,93	28,84	25,80	62,81	79,26	56,42	0,57	76,15
2	263,07	28,84	25,80	62,81	79,26	40,08	0,40	104,50
3	136,93	56,17	25,80	62,81	79,26	80,85	0,81	109,65
4	263,07	56,16	25,80	62,81	79,26	56,50	0,56	146,95
5	136,93	28,84	34,20	62,81	79,26	68,40	0,67	92,43
6	263,07	28,84	34,20	62,81	79,26	49,25	0,49	129,20
7	136,93	56,16	34,20	62,81	79,26	88,99	0,89	122,18
8	263,07	56,16	34,20	62,81	79,26	65,47	0,64	171,25
9	136,93	28,84	25,80	132,19	79,26	84,52	0,85	115,10
10	263,07	28,84	25,80	132,19	79,26	70,27	0,70	184,70
11	136,93	56,16	25,80	132,19	79,26	100,00	0,99	135,88
12	263,07	56,16	25,80	132,19	79,26	87,05	0,87	228,18
13	136,93	28,84	34,20	132,19	79,26	90,60	0,89	123,03
14	263,07	28,84	34,20	132,19	79,26	75,59	0,76	198,60
15	136,93	56,16	34,20	132,19	79,26	100,00	0,99	135,63
16	263,07	56,16	34,20	132,19	79,26	91,37	0,92	240,03
17	136,93	28,84	25,80	62,81	150,74	58,70	0,59	80,25
18	263,07	28,84	25,80	62,81	150,74	32,91	0,32	85,10
19	136,93	56,16	25,80	62,81	150,74	83,61	0,82	114,40
20	263,07	56,16	25,80	62,81	150,74	54,27	0,54	141,88
21	136,93	28,84	34,20	62,81	150,74	70,24	0,69	95,65
22	263,07	28,84	34,20	62,81	150,74	39,61	0,39	103,20
23	136,93	56,16	34,20	62,81	150,74	90,98	0,89	123,13
24	263,07	56,16	34,20	62,81	150,74	62,41	0,61	163,33
25	136,93	28,84	25,80	132,19	150,74	81,72	0,81	112,63
26	263,07	28,84	25,80	132,19	150,74	61,74	0,63	163,68
27	136,93	56,16	25,80	132,19	150,74	100,00	0,99	136,10
28	263,07	56,16	25,80	132,19	150,74	81,56	0,81	213,45
29	136,93	28,84	34,20	132,19	150,74	91,53	0,91	124,93
30	263,07	28,84	34,20	132,19	150,74	72,31	0,73	190,75
31	136,93	56,16	34,20	132,19	150,74	100,00	0,99	136,18
32	263,07	56,16	34,20	132,19	150,74	89,43	0,90	234,20
33	50,00	42,50	30,00	97,50	115,00	100,00	1,02	50,85
34	350,00	42,50	30,00	97,50	115,00	57,51	0,57	199,75
35	200,00	10,00	30,00	97,50	115,00	37,01	0,37	73,18
36	200,00	75,00	30,00	97,50	115,00	97,19	0,97	193,33
37	200,00	42,50	20,00	97,50	115,00	67,06	0,65	129,50
38	200,00	42,50	40,00	97,50	115,00	96,29	0,96	191,95
39	200,00	42,50	30,00	15,00	115,00	25,09	0,25	50,38
40	200,00	42,50	30,00	180,00	115,00	95,69	0,96	191,98
41	200,00	42,50	30,00	97,50	30,00	85,16	0,83	166,10
42	200,00	42,50	30,00	97,50	200,00	89,95	0,88	176,85
43	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	89,63	0,89	177,00
44	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	89,55	0,88	176,50
45	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	89,28	0,89	178,25
46	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	89,48	0,89	177,30
47	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	89,65	0,88	176,00
48	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	89,38	0,89	177,55
49	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	88,88	0,57	177,05
50	200,00	42,50	30,00	97,50	115,00	89,33	0,40	177,45

MKD'ye göre hazırlanan deneysel matrise uygun elde edilen deneysel çalışma sonuçları DesignExpert 8.0® yardımıyla çeşitli matematiksel modellere uyumluluğu istatistiksel olarak incelenmiştir. Sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu için istatistiksel analizler sonucunda elde edilen deneysel verilere en uygun matematiksel model ifadenin kuadratik (ikinci derece) formdaki denklem olduğu Tablo 3'den görülmektedir.

**Tablo 3.** Matematiksel model ifadelerinin istatistiksel analiz sonuçları.

Cevap değişkenleri	Model	Standart sapma	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	R <sup>2</sup> <sub>pred</sub>
Sakkaroz dönüşüm oranı	Doğrusal	8,60	0,831	0,812	0,790
	2FI	9,17	0,852	0,786	0,780
	<b>İkinci dereceden</b>	<b>3,84</b>	<b>0,978</b>	<b>0,963</b>	<b>0,903</b>
	Üçüncü dereceden	2,11	0,997	0,989	0,558
Hidroliz verimi	Doğrusal	0,084	0,84	0,82	0,80
	2FI	0,090	0,86	0,79	0,79
	<b>İkinci dereceden</b>	<b>0,040</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,90</b>
	Üçüncü dereceden	0,023	0,99	0,99	0,56
Toplam indirgen şeker konsantrasyonu	Doğrusal	21,93	0,80	0,78	0,75
	2FI	20,25	0,87	0,81	0,81
	<b>İkinci dereceden</b>	<b>7,75</b>	<b>0,98</b>	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>
	Üçüncü dereceden	4,25	0,99	0,99	0,70

Önerilen modelin tanımlayıcılığını artırmak amacıyla kuadratik model içerisinde bulunan sonuç değişkenine etkisi önemsiz olan terimler çıkarıldıktan sonra elde edilen matematiksel model ifadenin istatistik değerleri Tablo 4'de görülmektedir.

**Tablo 4.** İndirgenmiş ikinci dereceden model denklemin istatistiksel verileri

	Sakkaroz dönüşüm oranı	Hidroliz verimi	Toplam indirgen şeker konsantrasyonu
Standart sapma	3,63	0,038	7,51
Ortalama	76,85	0,76	147,46
Varyans katsayısı (C.V) %	4,72	5,03	5,09
Tahminlenmiş kalıntı hata kareler toplamı (PRESS)	1690,39	0,19	7363,04
R <sup>2</sup>	<b>0,978</b>	<b>0,976</b>	<b>0,984</b>
Adj-R <sup>2</sup>	<b>0,967</b>	<b>0,962</b>	<b>0,974</b>
Pred-R <sup>2</sup>	0,91	0,902	0,931
Adeq. Precision	37,38	33,21	41,57

Modelin deneysel sonuçlarla uyum derecesi, korelasyon katsayısı R ve çoklu regresyon katsayısı R<sup>2</sup>'nin değerine bakılarak kararlaştırılır [36]. R<sup>2</sup>'nin değeri 1'e ne kadar yakınsa, deneysel sonuçlar ile indirgenmiş model ifadeden elde edilmiş değerler arasındaki ilişki o ölçüde iyidir. Guan ve Yao [37] tarafından yapılan araştırmalar, iyi bir model uyumu için regresyon katsayısı R<sup>2</sup>'nin 0,8 olmasının genel olarak yeterli olduğunu göstermektedir. Matematiksel modele eklenen her bir bağımsız değişken, bağımlı değişkeni açıklama yeteneği olmasa bile R<sup>2</sup> değerinin büyümesine neden olmaktadır. Bu durum ise modelin açıklayıcılığının iyileştiği gibi yanlış bir sonuç doğurmaktadır. Bu nedenle modele katkısı olmayan değişkenleri dikkate almayarak daha gerçekçi bir R<sup>2</sup> değeri hesaplanmakta ve bu değer ayarlanmış/düzeltilmiş R<sup>2</sup> (Adj-R<sup>2</sup>) olarak ifade edilmektedir [38, 39]. Bu bilgiler doğrultusunda Tablo 3.3'de görüldüğü gibi sakkaroz dönüşüm oranı için önerilen model denklemin R<sup>2</sup>'si yaklaşık %98 gibi bir değerde olması, Adj-R<sup>2</sup>'nin ise yaklaşık %97 olması modelin deneysel verilerle uyumunu doğrulamaktadır. Hidroliz verimi için önerilen model denklemin R<sup>2</sup>'si ise yaklaşık %98, Adj-R<sup>2</sup>'nin ise %96 olması modelin uyumlu olduğunu göstermektedir. Son olarak, toplam indirgen şeker konsantrasyonu için önerilen model denklemin R<sup>2</sup>'sinin %98, Adj-R<sup>2</sup>'sinin ise %97 olması modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu doğrulamaktadır. Bu sonuçlar tasarımda elde edilen deneysel verilerle, program tarafından önerilen indirgenmiş kuadratik model denklemin sonuçları arasındaki uyumun yeterli olduğuna işaret etmektedir. 'Adequate Precision (Yeterli Kesinlik)', sinyal gürültü oranını ölçer. Bu ifadenin 4'ten büyük bir değerde elde edilmesi hedeflenir. Sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu için elde edilen değerler (37,38, 33,21 ve 41,57) yeterli bir sinyalin olduğunu göstermektedir.

Deneyler sonucunda elde edilen sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu için önerilen kuadratik formdaki model ifadelerin ANOVA test sonuçları Tablo 5'de görülmektedir. ANOVA test sonuçlarına göre *p*-değeri 0,05'ten küçük olan terimler sonuç değişkeni için önemli terimlerdir. Bu durumda, sakkaroz konsantrasyonu, enzim aktivitesi, ortam sıcaklığı ve reaksiyon süresi bağımsız değişkenlerinin hem lineer hem de üssel etkileri tüm sonuç değişkenleri için önemli etkiye sahiptirler. Ayrıca, sakkaroz konsantrasyonu ile reaksiyon süresi ve karıştırma hızı arasındaki etkileşim ile invertaz enzim aktivitesi ile reaksiyon süresi arasındaki etkileşim, incelen tüm sonuç değişkenleri için önemli olarak görülmektedir. Bu bağımsız değişkenlerdeki değişim ile diğer bağımsız değişkenlerin de optimum değerini değiştirecektir. Her üç



cevap değişkeni için de 0,1'den büyük değerler, model terimlerinin önemli olmadığını göstermektedir. Sonuç değişkeni olarak toplam indirgen şeker konsantrasyonu incelenen model ifadenin ANOVA test sonucunda sakkaroz konsantrasyonu ile enzim aktivitesi ve reaksiyon ortam sıcaklığının etkisinin de önemli olduğu görülmektedir. Diğer parametreler ile karşılaştırıldığında karıştırma hızının, incelenen aralıkta ve erlen sisteminde sonuç değişkenleri üzerine etkisinin çok önemli olmadığı da görülmektedir.

**Tablo 5.** Sakkarozun enzimatik hidrolizi deneylerinde sakkaroz dönüşüm oranı, hidroliz verimi ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu için ANOVA test sonuçları.

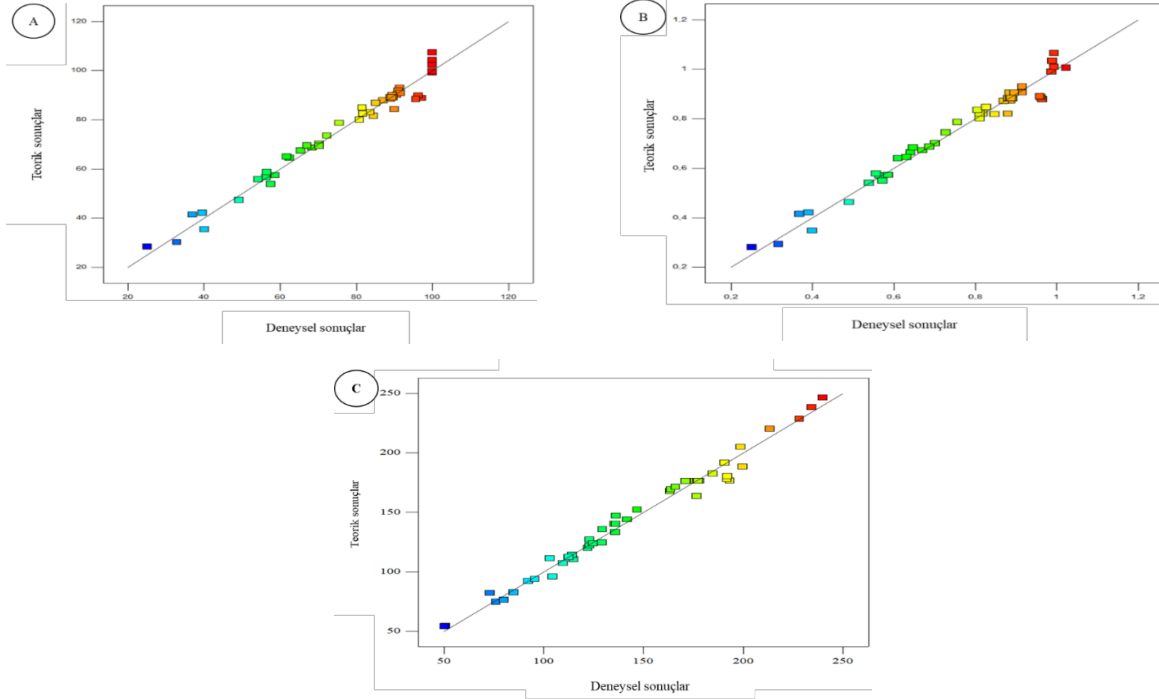
Kaynak	Sakkaroz dönüşümü		Hidroliz verimi		Toplam indirgen şeker miktarı	
	F-değeri	p-değeri	F-değeri	p-değeri	F-değeri	p-değeri
Model	89,63	<0,0001	70,73	<0,0001	103,36	< 0,0001
A-Sakkaroz konst., g/L	306,30	<0,0001	271,62	<0,0001	609,56	< 0,0001
B-Enzim aktivitesi, U/mL	327,09	<0,0001	280,44	<0,0001	301,75	< 0,0001
C-Sıcaklık, °C	60,37	<0,0001	53,77	<0,0001	60,29	< 0,0001
D-Süre, dk	524,92	<0,0001	484,39	<0,0001	542,31	< 0,0001
E-Karıştırma hızı, rpm	0,93	0,34	0,94	0,34	1,95	0,17
AB					19,30	<b>0,0001</b>
AC			0,26	0,62	4,41	<b>0,044</b>
AD	14,69	<b>0,0005</b>	14,92	<b>0,0005</b>	89,85	< 0,0001
AE	5,56	<b>0,03</b>	4,40	<b>0,04</b>	8,12	<b>0,0077</b>
BC	1,65	0,21	1,18	0,29	0,73	0,40
BD	5,10	<b>0,03</b>	4,67	<b>0,04</b>	3,55	<b>0,070</b>
BE	0,80	0,38	0,41	0,53	0,91	0,35
CD	1,87	0,18	1,17	0,29	1,27	0,27
CE			0,22	0,64		
A <sup>2</sup>	19,95	<0,0001	12,93	<b>0,0011</b>	93,28	< 0,0001
B <sup>2</sup>	75,73	<0,0001	65,77	<0,0001	68,27	< 0,0001
C <sup>2</sup>	11,61	<b>0,0017</b>	11,30	<b>0,0021</b>	11,83	<b>0,0017</b>
D <sup>2</sup>	124,12	<0,0001	104,14	<0,0001	107,79	< 0,0001
E <sup>2</sup>	1,61	0,21	2,79	0,11	2,41	0,13

MKD'ye göre yapılan deneysel çalışmanın yazılım yardımıyla yapılan istatistiksel analizi sonucu her bir cevap değişkeni için elde edilen matematiksel model ifade katsayıları Tablo 6'da kodlu değerler cinsinden verilmiştir.

**Tablo 6.** Her bir cevap değişkeni için elde edilen matematiksel model ifade katsayıları

Model terimleri	Sakkaroz dönüşüm oranı model katsayıları	Hidroliz verimi model katsayıları	Toplam indirgen şeker miktarı model katsayıları
	-208,40	-1,90	-430,93
* A	+0,03	-4,93 x10 <sup>-4</sup>	+0,45
* B	+3,25	+0,03	+4,69
* C	+7,84	+0,07	+13,60
* D	+1,33	+0,01	+1,84
* E	+0,18	+1,64 x10 <sup>-3</sup>	+0,46
*A*B	-	-	+6,76 x10 <sup>-3</sup>
*A*C	+1,12 x10 <sup>-3</sup>	+1,30 x10 <sup>-5</sup>	+0,011
*A*D	-	+1,20 x10 <sup>-5</sup>	+5,75 x10 <sup>-3</sup>
*A*E	-6,71 x10 <sup>-4</sup>	-6,31 x10 <sup>-6</sup>	-1,68 x10 <sup>-3</sup>
*B*C	-0,01	-1,28 x10 <sup>-4</sup>	-0,02
*B*D	-3,05 x10 <sup>-3</sup>	-3,09 x10 <sup>-5</sup>	-5,28 x10 <sup>-3</sup>
*B*E	+1,18 x10 <sup>-3</sup>	+8,87 x10 <sup>-6</sup>	+2,59 x10 <sup>-3</sup>
*C*D	-6,01 x10 <sup>-3</sup>	-5,02 x10 <sup>-5</sup>	-0,01
*C*E	-	+2,11 x10 <sup>-5</sup>	-
* A <sup>2</sup>	-5,46 x10 <sup>-4</sup>	-4,65 x10 <sup>-6</sup>	-2,45 x10 <sup>-3</sup>
* B <sup>2</sup>	-0,02	-2,24 x10 <sup>-4</sup>	-0,05
* C <sup>2</sup>	-0,09	-9,79 x10 <sup>-4</sup>	-0,20
* D <sup>2</sup>	-4,51 x10 <sup>-3</sup>	-4,37 x10 <sup>-5</sup>	-8,69 x10 <sup>-3</sup>
* E <sup>2</sup>	-4,84 x10 <sup>-4</sup>	-6,73 x10 <sup>-6</sup>	-1,22 x10 <sup>-3</sup>

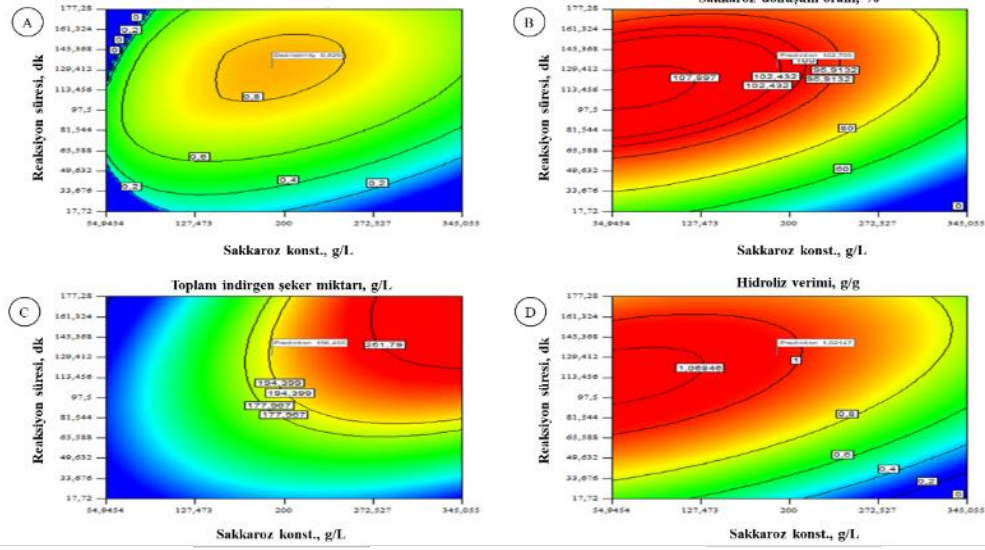
Önerilen model eşitliği kullanılarak hesaplanan teorik sonuçlara (istatistiksel olarak tahmin edilen değerler) karşı deneysel olarak belirlenen sonuçların dağılımı Şekil 1A-C'de verilmiştir. Şekil 1A-C'den de görüldüğü gibi teorik ve deneysel değerler lineer doğrunun etrafında dağılım göstermektedir. Bu dağılım, deneysel veriler ile modelden elde edilen verilerin uyumlu olduğunu göstermektedir. Şekil 1A-C'deki renkli kutuların her biri farklı şartlardaki deney sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 1. Sakkaroz dönüşüm oranı (A), hidroliz verimi (B) ve toplam indirgen şeker konsantrasyonu (C) değerlerine ait teorik sonuçlar ile deneysel olarak belirlenmiş sonuçlar arasındaki uyum grafikleri

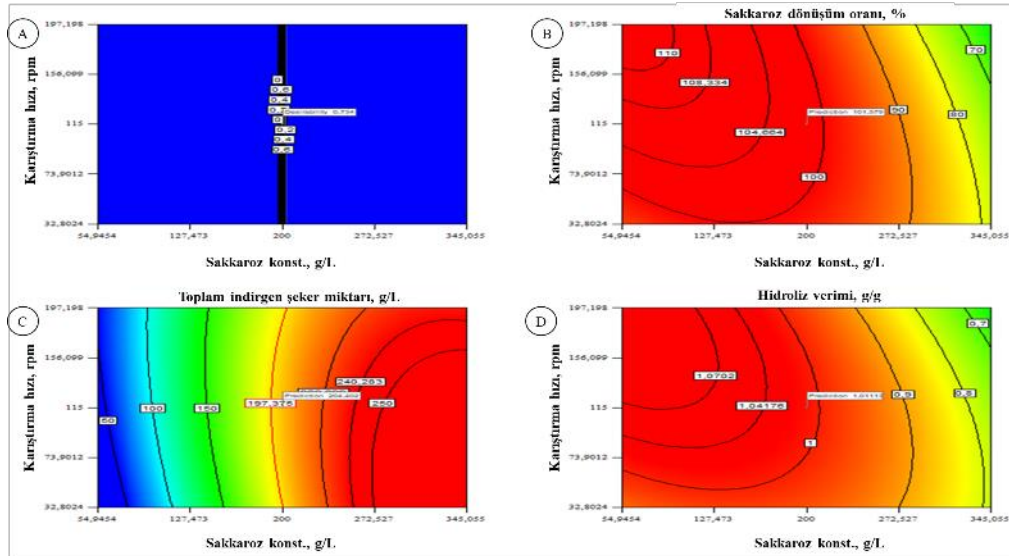
Yüzey tarama yöntemiyle az sayıda deneyde çok sayıda veri elde etmenin yanında bağımsız değişkenlerin cevap değişkenine eş zamanlı etkileri kontur veya 3D grafikler ile analiz edilebilmektedir. Sakkarozun invertaz enzimi yardımıyla invert şekerlere hidroliz edilmesini optimize etmeyi amaçlayan deneysel tasarımın grafikleri Şekil 2-4'de verilmiştir. Tablo 5'de verilen ANOVA test sonuçları incelendiğinde bağımsız değişkenlerin birbirleriyle birçok farklı varyasyonlarda etkileşime girdikleri görülmektedir. Bununla birlikte, her üç cevap değişkeni içinde *p*-değeri 0,05'den küçük olan farklı bağımsız değişkenlerin (AD, AE ve BD) birbirleriyle etkileşimleri kontur grafikler yardımıyla incelenmiştir. Verilen kontur grafiklerde incelenen iki bağımsız değişkenin cevap değişkenine eş zamanlı etkileri görülmektedir. Grafiklerin kırmızıdan maviye giden renk skalası azalan cevap değişken değerini temsil edilmektedir.

Şekil 2'de sakkaroz konsantrasyonu ve reaksiyon süresinin cevap değişkenlerine eş zamanlı etkileri görülmektedir. Artan sakkaroz konsantrasyonu ile dönüşüm oranında bir düşüş gözlenmiştir. Dönüşüm oranı ifadesinin hesaplanma şekline uygun olarak düşük sakkaroz konsantrasyonlarında (55-120 g/L) daha yüksek bir dönüşüm gözlenmektedir. İncelenen tüm sakkaroz konsantrasyonlarında artan süre ile bir artış gözlenmiş 2 saat sonraki süreçte dönüşüm oranında önemli bir değişim gözlenmemiştir. Sonuç değişkeni olarak toplan indirgen şeker konsantrasyonunu esas alan model ifadeden elde edilen sonuç Şekil 2C'de görülmektedir. Sakkaroz dönüşüm oranının tam tersi ayna görüntüsü olarak elde edilen şekilde artan sakkaroz konsantrasyonu ile indirgen şeker miktarı artmaktadır. Reaksiyon süresi ve sakkaroz konsantrasyonunun üst noktasında (345 g/L sakkaroz, 177 dk) maksimum değere ulaşmaktadır. Optimum değerinin incelenen aralık dışında kaldığı grafikten görülmektedir. Dönüşüm oranının kısmen düşük kaldığı noktada indirgen şeker miktarının maksimum değere ulaştığı görülmektedir. İndirgen şeker miktarının başlangıçtaki sakkaroz oranıyla elde edilen verim ifadesinin sonuç değişkeni olarak seçildiği model için elde edilen Şekil 2D'de görülmektedir. Yan ürünlerin oluşumunun olmaması veya etkileyecek değerde olmaması dolayısıyla sakkaroz dönüşüm oranı ile benzer bir değişim gözlenmektedir.



Şekil 2. Sakkaroz konsantrasyonu ile reaksiyon süresinin takip edilen cevap değişkenlerine eş zamanlı etkisi

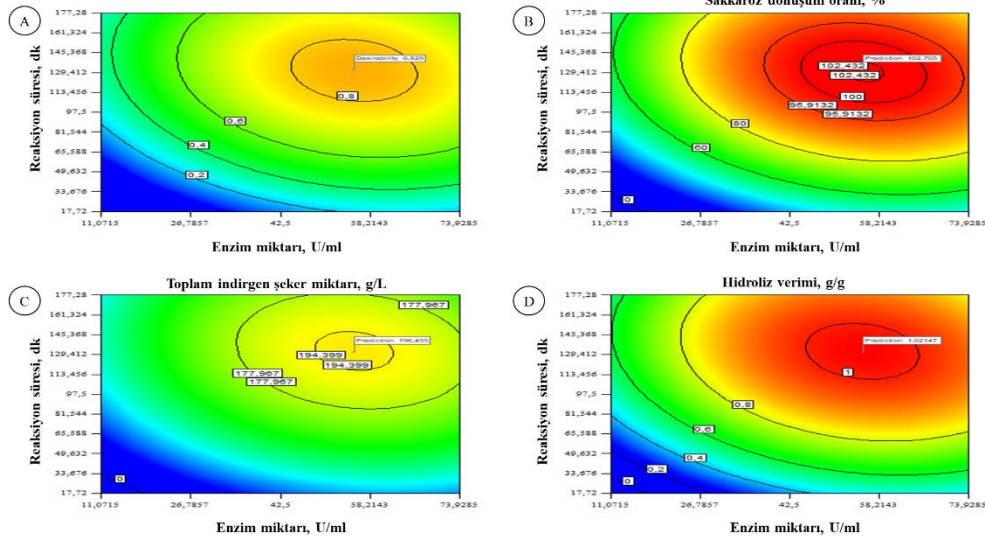
Şekil 3'de karıştırma hızı ile sakkaroz konsantrasyon değişiminin cevap değişkenlerine etkisini gösteren kontur grafikleri verilmiştir. Sakkaroz dönüşüm oranının takip edildiği model ifadeden elde edilen sonuçlar Şekil 3B'de verilmiştir. Şekil 3B'den görüldüğü üzere yüksek sakkaroz konsantrasyonunda karıştırma hızının dönüşüm oranına etkisi sınırlı kalmaktadır. Düşük sakkaroz konsantrasyonlarında artan karıştırma hızı dönüşüm oranını artırmaktadır. Toplam indirgen şeker miktarının takip edildiği sonuçlarda (Şekil 3D) ise dönüşüm oranında elde edilen değer aksine yüksek sakkaroz konsantrasyonlarında karıştırma hızının etkinliği daha önemlidir.



Şekil 3. Sakkaroz konsantrasyonu ile karıştırma hızının takip edilen cevap değişkenlerine eş zamanlı etkisi

Şekil 4 enzim miktarı ve reaksiyon süresinin cevap değişkenlerine eş zamanlı etkilerini göstermektedir. Çizilen kontur grafiklerde bulunmayan bağımsız değişkenler optimum noktada tutulmuştur. Diğer değişkenlerin optimum değerde olduğu noktada seçilen üç sonuç değişkeni için benzer bir değişim Şekil 4'den görülmektedir. 58 U/mL aktiviteye kadar enzim miktarındaki artış ile sonuç değişkenlerinde net bir artış gözlenmekle birlikte bu değerinin üzerinde azalma gözlenmektedir. Benzer şekilde 2 saat süreye kadar geçen reaksiyon sürecinde sonuç değişkenlerinde artış gözlenirken üzerindeki değerlerde azalma gözlenmektedir. En uygun hidroliz şartları 130 dk, 58 U/mL civarında olduğu görülmektedir.

## Sakkarozun Enzimatik Olarak Hidrolizinin Optimizasyonu



**Şekil 4.** Enzim miktarı ile reaksiyon süresinin takip edilen cevap değişkenlerine eş zamanlı etkisi

Elde edilen matematiksel model ifadeler farklı şartlar ve sonuç değişkenleri için çözümlenebilir. Hidrolizatın eldesinde hem sakkarozun toplam dönüşümünü hem de elde edilen son ürünün maksimum olduğu şartlar seçilerek yapılacak optimizasyon daha ekonomik ve akılcı bir yoldur. Bu amaçla, elde edilen matematiksel model ifadeyi oluşturan bağımsız değişkenlerin incelenen aralıklar içerisinde ilk olarak sadece toplam indirgen şeker miktarını ve sakkaroz dönüşüm oranını maksimize eden rakamsal değerler program yardımıyla bulunmuştur. Tablo 7’de belirlenen en uygun ortam bileşen değerleri ve bu şartlar için Design Expert 8.0® programıyla hesaplanan toplam indirgen şeker miktarı ve sakkaroz dönüşüm oranı değerleri verilmiştir. Ayrıca maksimum hidroliz verimi ve sakkaroz dönüşüm oranı için önerilen şartlarda ulaşılan deneysel sonuçları da Tablo 7’de görülmektedir.

**Tablo 7.** Cevap değişkenlerinin maksimum olduğu şartlar için indirgenmiş modelin önerdiği ve deneysel olarak bulunan değerler

Cevap değişkeni	Sakkaroz konst., g/L	Enzim aktivitesi, U/mL	Sıcaklık, °C	Süre, dk	Karıştırma hızı, rpm	Modelin önerdiği sonuçlar	Deneysel sonuçlar
Toplam indirgen şeker miktarının maksimum olduğu durum	Sakkaroz dönüşüm oranı, %					72,09	69,27
	Toplam indirgen şeker miktarı, g/L	345,055	61,18	36,25	177,28	32,81	303,22
	Hidroliz verimi, g/g					0,74	0,69
Sakkaroz dönüşüm oranının maksimum olduğu durum	Sakkaroz dönüşüm oranı, %					105,21	100,00
	Toplam indirgen şeker miktarı, g/L	114,03	59,15	26,6	122,41	160,1	120,87
	Hidroliz verimi, g/g					1,04	0,99
Sakkaroz dönüşüm oranı ve hidroliz veriminin maksimum olduğu durum	Sakkaroz dönüşüm oranı, %					102,69	98,5
	Toplam indirgen şeker miktarı, g/L	190,6	55,36	33,46	131,1	120,86	196,50
	Hidroliz verimi, g/g					1,02	0,97

Tablo 7’den de görüldüğü gibi sadece toplam indirgen şeker miktarının maksimum olduğu durumda sakkaroz dönüşüm oranı için %96,08, toplam indirgen şeker konsantrasyonu için %80 ve hidroliz verimi için %93,24 olacak şekilde model ve deneysel değerlerin uyumlu olduğu, sadece sakkaroz dönüşüm oranının maksimum olduğu durumda sakkaroz dönüşüm oranı için %95,1, toplam indirgen şeker konsantrasyonu için %93,66 ve hidroliz verimi için %95,20 olacak şekilde model ve deneysel değerlerin uyumlu olduğu belirlenmiştir. Son olarak, sakkaroz dönüşüm oranı ve hidroliz veriminin maksimum olduğu durumda sakkaroz dönüşüm oranı için %95,92,

toplam indirgen şeker konsantrasyonu için %96,26 ve hidroliz verimi için %95,10 olacak şekilde model ve deneysel değerlerin uyumlu olduğu da Tablo 7’de görülmektedir. Elde edilen model ifadelerin farklı sonuç değişkenleriyle çözümü sonucunda optimum şartların değiştiği görülmüştür. Belirlenen optimum noktalarda yapılan doğrulama deneyleri ile seçilen her bir cevap değişkeni için model ifadelerin sonuçlarının oldukça yüksek bir uyum gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, çalışmada elde edilen hidroliz işleminde en önemli reaksiyon parametreleri olan sıcaklık ve pH değerleri, farklı bir çalışmada elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında sonuçların uyum içerisinde olduğu da görülmektedir [2].

Literatürde direkt sakkaroz kullanılarak ticari olarak temin edilen invertaz enzimi yardımıyla hidroliz şartlarının optimizasyonunun yapıldığı bir çalışma bilgimize göre literatürde bulunmamaktadır. Bununla birlikte, mikroorganizma kaynaklı invertaz enzimiyle sakkarozun hidrolizinin gerçekleştirildiği bazı çalışmalar literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmaların birinde Batista vd. [40] izole etikleri *Aspergillus carbonarius* PC-4 suşu ile ananasın atık yapraklarından (taç kısımları) invertaz enzim üretimini optimize etmeyi ve üretilen enzim yardımıyla sakkarozu hidroliz ederek invert şekerleri üretmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, kültür ortamı besin bileşenlerinin optimizasyonunda simpleks kafes tasarımı, fizikokimyasal parametrelerin optimizasyonunda ise tek faktörlü deneysel tasarım yöntemlerini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, optimize edilmiş koşullarda enzim üretimi 72 saat sonra maksimum 9,4 U/mL enzim aktivitesi ile  $R^2=0,91,85$ ,  $R^2_{adj}=0,85,06$ , yüksek F-değeri (13,52) ve düşük p-değeri (0,003) ananas taç atığı ve maya ekstraktı içeren kültürlerden elde edilmiştir. Üretilen enzimin fizikokimyasal koşullarının optimizasyonu sonucunda sıcaklık 20 °C, pH 5,5, karıştırma hızı 180 rpm ve süre 72 saat olarak belirlenmiştir [40]. Başka bir çalışmada melas içeriğindeki sakkarozun enzimatik hidroliz ile invert şekerlere dönüştürülmesi amaçlanmıştır. Yapılan MKD tasarım deneyleri sonucunda deneysel çalışma şartları melas konsantrasyonu 87,7 g/L, enzim konsantrasyonu %0,45 (v/v) ve hidroliz süresi 15,93 saat olarak belirlenmiştir. Yapılan optimizasyon işlemi sonucunda indirgen şeker konsantrasyonu 43,936 g/L ve sakkaroz konsantrasyonu 1,879 g/L olup melastaki sakkaroz ağırlıkça yaklaşık %96’lık bir verim değeri ile fermente edilebilir şekerlere dönüştürülmüştür [41]. Sonuç olarak, literatürde invertaz enzimiyle sakkarozun hidroliz edilmesine yönelik farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, literatürde ifade edilen çalışmalardan farklı olarak sakkaroz hidrolizatının hazırlanması için hidroliz şartlarıyla farklı cevap değişkenleri arasında enzim aktivitesini de içeren matematiksel model bir denklem ortaya konulmuştur.

#### 4. Sonuçlar

Gıda endüstrisinde tatlandırıcı ve katma değeri yüksek endüstriyel ürünlerin üretiminde hammadde olarak kullanılabilen glukoz ve fruktoz, kısmen kolay temin edilebilen bir şeker olan sakkarozun hidroliziyle elde edilebilmektedir. Sakkarozun enzimatik hidrolizi, eşmolar glukoz ve fruktozun (invert şekerler) bir karışımını üretir. Sakkarozun hidroliziyle elde edilen fruktozun tatlandırma gücü sakkarozdan daha yüksek olmasından dolayı gıda endüstrisinde tatlandırıcı olarak daha yaygın kullanılmaktadır. Hidrolizatta bulunan fruktoz, sakkarozdan daha tatlı olmasından dolayı daha yüksek bir ticari değere sahiptir. Sakkarozun kısmi veya tam hidroliz ürünleri, yüksek higroskopisiteleri ve kristalleşmeye karşı dirençleri nedeniyle yiyecek ve içecek endüstrisinde tatlandırıcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, sakkarozun hidroliziyle elde edilen glukoz ve fruktozun katma değeri yüksek kimyasalların üretiminde yaygın bir şekilde kullanıldıkları da bilinmektedir. Bu çalışmada yiyecek ve içecek endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılan indirgen şekerlerin deneysel tasarım yöntemiyle invertaz enzimi yardımıyla hidroliz reaksiyon şartları optimize edilmiştir. Enzimatik hidroliz için seçilen invertaz enziminin aktivitesi belirlenerek farklı aktivitede bulunacak enzimlerin hidroliz işleminde kullanımı için model ifadeler oluşturulmuştur. Enzim aktivite deneylerinden ve literatürde elde edilen verilere uygun tasarım oluşturulmuş ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hem verimin hem de indirgen şekerin maksimum olması amacıyla yapılan optimizasyon işlemleri sonucunda sakkaroz konsantrasyonu 190,16 g/L, enzim aktivitesi (U/mL) 55,36, sıcaklık 33,46 °C, reaksiyon süresi 131,10 dk ve karıştırma hızının 120,86 rpm olarak bulunmuştur. Optimizasyon işlemi sonucundaki şartlarda elde edilen sakkaroz dönüşüm oranı %96 ve hidrolizi verimi %95 gibi yüksek oranda olması modelin önerdiği sonuçlarla deneysel sonuçların uyumlu olduğunu göstermiştir.

Böylece, deneysel çalışmalarda kullanılabilecek sakkaroz hidrolizatının hazırlanması için hidroliz şartlarıyla farklı cevap değişkenleri arasında matematiksel bir ilişki ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, indirgen şeker üretim proseslerinde invertaz enzimi yardımıyla sakkarozun hidrolizi için verimli çalışma koşulları belirlenmiştir.

## Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya 122M865 proje numarası ile 1002-Hızlı Destek-A projesi kapsamında maddi desteğinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- [1] Rippe JM. Fructose, high fructose corn syrup, sucrose, and health: modern scientific understandings (pp. 3-12). New York: Springer, 2014.
- [2] Bolotova K. Sucrose and corn fiber hydrolysis using a succinic acid catalyst, 2005.
- [3] Yamabe S, Guan W, and Sakaki S. Three competitive transition states at the glycosidic bond of sucrose in its acid-catalyzed hydrolysis. *The Journal of Organic Chemistry*, 2013; 78(6), 2527-2533.
- [4] dos Santos RP, Martins J, Gadelha C, Cavada B, Albertini AV, Arruda F, ... and Freire V. Coal fly ash ceramics: preparation, characterization, and use in the hydrolysis of sucrose. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [5] Akdağ B. Investigation of thermostable recombinant glucose isomerase production by sucrose utilizing *Escherichia coli*. Master's thesis, M. Sc. Thesis, Middle East Technical University, Turkey, 2013.
- [6] Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA). "Şeker ve Tatlandırıcılar Yıllığı Tabloları: Tablo 2 (22.95 ¢/lb)". <https://www.ers.usda.gov/data-products/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/> (Son erişim Tarihi: 15 Temmuz 2022).
- [7] Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA). "Şeker ve Tatlandırıcılar Yıllığı Tabloları: Tablo 8 (41.0 ¢/lb)". <https://www.ers.usda.gov/data-products/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/> (Son erişim Tarihi: 15 Temmuz 2022).
- [8] Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı (USDA). "Şeker ve Tatlandırıcılar Yıllığı Tabloları: Tablo 9 (HFCS-42: 35.92 ¢/lb; HFCS-55: 42.53 ¢/lb)". <https://www.ers.usda.gov/data-products/sugar-and-sweeteners-yearbook-tables/> (Son erişim Tarihi: 15 Temmuz 2022).
- [9] Howard JM. Catalytic conversion of sugar manufacturing by-products to 5-(chloromethyl) furfural and 5-(hydroxymethyl) furfural, Doctoral dissertation, Queensland University of Technology, 2017.
- [10] Alves L, and Paixão SM. Fructophilic behaviour of *Gordonia alkanivorans* strain 1B during dibenzothiophene desulfurization process. *New biotechnology*, 2014; 31(1), 73-79.
- [11] Solís-Fuentes JA, Guzmán-Flores LF, and Durán-de-Bazúa MC. Kinetic behavior of invertase in the hydrolysis of sucrose in complex sugarcane juice. *International Sugar Journal* 2013; 115(1375), 488-494.
- [12] Shankar T, Thangamathi P, Rama R, and Sivakumar T. Characterization of invertase from *Saccharomyces cerevisiae* MK obtained from toddy sample. *J Bioprocessing and Chemical Engineering* 2014; 1(2), 1-6.
- [13] Essel KK, and Osei YD. Investigation of some kinetic properties of commercial invertase from yeast 2014.
- [14] Kulshrestha S, Tyagi P, Sindhi V, and Yadavilli KS. Invertase and its applications—a brief review. *Journal of Pharmacy Research* 2013; 7(9), 792-797.
- [15] Nadeem H, Rashid MH, Siddique MH, Azeem F, Muzammil S, Javed MR, ... and Riaz M. Microbial invertases: A review on kinetics, thermodynamics, physicochemical properties. *Process Biochemistry* 2015; 50(8), 1202-1210.
- [16] İşgören A, and Sungur S. Tatlandırıcılar. *Lectio Scientific* 2019; 3(1), 19-33.
- [17] Monsan P, and Combes D. Application of immobilized invertase to continuous hydrolysis of concentrated sucrose solutions. *Biotechnology and bioengineering* 1984; 26(4), 347-351.
- [18] Asadi M. Beet-sugar handbook. John Wiley & Sons, 2006.
- [19] Yuçekan I, and Önal S. Physicochemical properties of invertase partitioned in an aqueous two-phase system of poly (ethylene glycol)/sodium sulfate, 2012.
- [20] Diamond G, Hagemeyer A, Murphy V, and Sokolovskii V. Catalytic conversion of biorenewable sugar feedstocks into market chemicals. *Combinatorial Chemistry & High Throughput Screening* 2018; 21(9), 616-630.
- [21] Eblagon KM, Pereira MFR, and Figueiredo JL. One-pot oxidation of cellobiose to gluconic acid. Unprecedented high selectivity on bifunctional gold catalysts over mesoporous carbon by integrated texture and surface chemistry optimization. *Applied Catalysis B: Environmental* 2016; 184, 381-396.
- [22] Ramachandran S, Fontanille P, Pandey A, and Larroche C. Gluconic acid: properties, applications and microbial production. *Food Technology & Biotechnology* 2006; 44(2).
- [23] Canete-Rodriguez AM, Santos-Duenas IM, Jimenez-Hornero JE, Ehrenreich A, Liebl W, and Garcia-Garcia I. Gluconic acid: Properties, production methods and applications—An excellent opportunity for agro-industrial by-products and waste bio-valorization. *Process biochemistry* 2016; 51(12), 1891-1903.

- [24] Vitolo M. Invertase. In S. Said and R.C.L.R. Pietro, (Eds.), *Enzymes as Biotechnological Agents* (pp. 207–221). Legis Summa, Ribeirao Preto. Sao Paulo, Brazil, 2004.
- [25] Kotwal SM, and Shankar V. Immobilized invertase. *Biotechnology advances* 2009; 27(4), 311-322.
- [26] de Souza Soares A, Augusto PED, Júnior BRDCL, Nogueira CA, Vieira ÉNR, de Barros FAR, ... and Ramos AM. Ultrasound assisted enzymatic hydrolysis of sucrose catalyzed by invertase: Investigation on substrate, enzyme and kinetics parameters. *Lwt* 2019; 107, 164-170.
- [27] Guimarães LHS, Terenzi HF, de Moraes MDLT, and Jorge JA. Production and characterization of a thermostable extracellular  $\beta$ -D-fructofuranosidase produced by *Aspergillus ochraceus* with agroindustrial residues as carbon sources. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007; 42(1), 52-57.
- [28] Gómez-Brizuela L, Luis-Orozco J, Ramírez-Pérez HL, Yll-Lavín M, Díaz-Suarez S, Michelena-Álvarez G, and Dustet-Mendoza JC. Comparison of economic indicators of the sucrose acid inversion or by enzymatic hydrolysis. *Biocología Aplicada* 2017; 34(4), 4401-4404.
- [29] Rebroš M, Rosenberg M, Mlichová Z, and Křištofiková L. Hydrolysis of sucrose by invertase entrapped in polyvinyl alcohol hydrogel capsules. *Food Chemistry* 2007; 102(3), 784-787.
- [30] Keramat A, Kargari A, Sohrabi M, and Mirshekar H. Experimental investigation and determination of an optimum condition for sucrose hydrolysis by invertase, 2014.
- [31] Gopalakrishnan D, Jain A. A statistical and downstream approach for the improvement of protease production from *Bacillus toyonensis* Vkb5 isolated from *Actinidia deliciosa*. *J Microbiol Biotechnol Food Sci* 2021.
- [32] Enzymatic Assay of INVERTASE (EC 3.2.1.26) [https://www.creative-enzymes.com/resource/enzymatic-assay-protocols\\_17.html](https://www.creative-enzymes.com/resource/enzymatic-assay-protocols_17.html) (Son erişim tarihi: 10 Nisan 2023).
- [33] Alegre ACP, Polizeli MDLTD, Terenzi, HF, Jorge JA, Guimarães LHS. Production of thermostable invertases by *Aspergillus caespitosus* under submerged or solid state fermentation using agroindustrial residues as carbon source. *Brazilian Journal of Microbiology* 2009; 40, 612-622.
- [34] Osiebe O, Adewale IO, Omafuvbe BO. Production and characterization of intracellular invertase from *Saccharomyces cerevisiae* (OL629078. 1), using cassava-soybean as a cost-effective substrate. *Scientific Reports* 2023; 13(1), 16295.
- [35] Addezio FD, Yoriyaz EJ, Cantarella M, and Vitolo M. Sucrose hydrolysis by invertase using a membrane reactor: effect of membrane cut-off on enzyme performance. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* 2014; 50(2), 257-259.
- [36] Dorleku WP, Bayitse R, Hansen ACH, Saalia FK, and Bjerre AB. Response surface optimisation of enzymatic hydrolysis of cassava peels without chemical and hydrothermal pretreatment. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2022; 1-14.
- [37] Guan X, and Yao H. Optimization of Viscozyme L-assisted extraction of oat bran protein using response surface methodology. *Food chemistry* 2008; 106(1), 345-351.
- [38] Hamza SM. Impact of credit risk management on banks performance: A case study in Pakistan banks. *European Journal of Business and Management* 2017; 9(1), 57-64.
- [39] Guillemette M, Finke MS, and Gilliam J. Risk tolerance questions to best determine client portfolio allocation preferences. *Journal of Financial Planning* 2012; 25(5), 36-44.
- [40] Batista RD, Melo FG, do Amaral Santos CCA, de Paula-Elias FC, Perna RF, Xavier MCA, ... de Almeida AF. Optimization of  $\beta$ -fructofuranosidase production from agrowaste by *Aspergillus carbonarius* and its application in the production of inverted sugar. *Food Technology and Biotechnology* 2021; 59(3), 306-313.
- [41] Doğan NK, Kalender M. Şeker Pancarı Melasından *Escherichia coli* KO11 Suşu ile Biyoetanol Üretimi: Enzimatik Hidroliz ve Kesikli Fermantasyon. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2023; 35(1), 15-23.





## Ti<sub>50</sub>Ni<sub>27</sub>Nb<sub>20</sub>Ta<sub>3</sub> Şekil Hatırlamalı Alaşımında Isıl İşlemlerin Faz Dönüşüm Histeresizi ve Termal Aktivasyon Enerjisi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Esra BALCI<sup>1\*</sup>, Fethi DAĞDELEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup> Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> eesra0122@gmail.com, <sup>2</sup> fdagdelen@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 12/09/2023;

Kabul/Accepted: 20/02/2024)

**Öz:** Bu çalışmada dördü TiNiNbTa alaşımına farklı ısıl işlemler uygulanarak alaşımın termal parametreleri üzerine ısıl işlemlerin etkileri incelendi. Isıl işlem sıcaklıkları 700°C, 800°C ve 900°C seçildi. Isıl işlem yapılan alaşımların DSC eğrileri farklı ısıtma-soğutma hızına bağlı olarak alındı. Isıl işlem sıcaklığını artmasına bağlı alaşımın dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı belirlendi. Fakat artan ısıl işlem sıcaklığı ile termal aktivasyon enerjisinin önemli derecede arttığı gözlemlendi. Ayrıca ısıl işlem sıcaklığının artması austenite faz pik minimumunu ( $A_p$ ) ve dönüşüm histeresizini ( $H_f$ ) önemli derecede azalttığı gözlemlendi.

**Anahtar kelimeler:** TiNiNbTa, Şekil Hatırlamalı Alaşım, Termal Parametreler, Dönüşüm Histeresizi.

### Investigation of The Effects of Heat Treatments on Phase Transformation Hysteresis and Thermal Activation Energy in Ti<sub>50</sub>Ni<sub>27</sub>Nb<sub>20</sub>Ta<sub>3</sub> Shape Memory Alloy

**Abstract:** In this study, the effects of heat treatments on the thermal parameters of the alloy were investigated by applying different heat treatments to the quaternary TiNiNbTa alloy. Heat treatment temperatures of 700°C, 800°C and 900°C were selected. DSC curves of heat-treated alloys were taken depending on different heating-cooling rates. It was determined that the transformation temperatures of the alloy decreased due to the increase in the heat treatment temperature. However, it was observed that the thermal activation energy increased significantly with increasing heat treatment temperature. In addition, it was observed that increasing the heat treatment temperature significantly decreased the austenite phase peak minimum ( $A_p$ ) and conversion hysteresis ( $H_f$ ).

**Key words:** TiNiNbTa, Shape Memory Alloys, Thermal Parameters, Transformation Hysteresis.

#### 1. Giriş

Şekil hatırlamalı alaşımlar (ŞHA) akıllı malzemelerin bir alt grubu olmakla beraber, uygulanan termomekanik zorlar ile faz dönüşümleri sergileyebilen ve belirli sıcaklıkların üzerinde ısıtıldığında eski haline geri dönebilen alaşımlar olarak tanımlanır. ŞHA'lar diğer alaşımlardan farklı kılan en önemli karakteristikleri şekil hatırlama etkisi (SHE) ve süper elastiklik (SE) özellik göstermeleridir [1]. Bu özellikleri en çok taşıyan alaşımlar NiTi alaşımları başta olmak üzere, birçok bakır bazlı (CuAlNi, CuZnAl gibi), demir bazlı (FePt, FeMnSi gibi), gümüş bazlı (AgAuCu) ve altın bazlı (AuCuAl) alaşımlardır [2]. Şekil hatırlamalı alaşımlar için faz dönüşüm sıcaklıkları martensite başlama:  $M_s$ , martensite bitiş:  $M_f$ , austenite başlama:  $A_s$  ve austenite bitiş:  $A_f$  değerleri şekil hatırlama davranışını karakterize etmek için önemli sıcaklıklardır. Martensitik faz dönüşümleri gerçekleştiğinde çok sayıda fiziksel özellik değişmektedir. Alaşım kristal yapı değişikliği yapar NiTi alaşımları martensite fazda iken B19' kristal yapıda iken austenite faza geçişte B2 kristal yapıya dönüş yapar. Austenite faz yüksek sıcaklık fazı olarak tanımlanır ve kübik yapıdadır. Bu değişiklikler dönüşüm sıcaklıklarının ölçülmesine izin verir. Bu amaçla diferansiyel kalorimetrik tarama cihazı (DSC) veya elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemleri kullanılarak gerekli analizler yapılır. NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar, üçüncü veya dördüncü elementler katılarak faz dönüşüm sıcaklıklarının değişmesine izin verirken aynı zamanda mekanik özelliklerinin de iyileştirilmesine yardımcı olur. Yüksek korozyon direncine sahip olması, iyi biyouyumluluk özelliği sergilemesi, hafiflik gibi özellikler NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar için istenilen özelliklerdir [3]. Niyobyum (Nb) oksidasyon direnci yüksektir ve yüksek dayanım özelliklerine sahip bir elementtir [4]. Ayrıca, Nb büyük dönüşüm histeresizinin gösterilmesi ve yüksek esnekliğe sahip olması en önemli özellikleridir [5-9]. Özellikle şekil hatırlamalı alaşımlara Tantan (Ta) elementi katılması biyomedikal uygulamalar için ön plana çıkartmaktadır.

\* Sorumlu yazar: [eesra0122@gmail.com](mailto:eesra0122@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-0127-7602, <sup>2</sup> 0000-0001-9849-590X

NiTi alaşımlarında Ni elementi ile zengin olan NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlarda süper esneklik özelliği ön planda iken, Titanyum elementi bakımından zengin olan bu alaşımlarda önemli olan etken şekil hatırlama etkisidir [10, 11]. NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlarda gerçekleşen faz dönüşümleri çoklu dönüşüm veya kademeli dönüşüm göstermektedir [12, 13]. Genel olarak, R (rombohedral faz) fazı, B19' fazından önce gözlemlenen kademeli dönüşümü temsil etmektedir. NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımların ısıl işlem ve kimyasal bileşimi, dönüşüm sıcaklıklarını etkileyen önemli faktörlerdir [14]. Bu alaşımlara katılan Pd, Hf, Pt ve Zr martensit dönüşüm sıcaklıklarını, histerisizlikleri ve termomekaniksel karakteristiklerini arttırmak için eklenirken; Fe, Al, Mo ve Nb elementlerinin katılması bu karakteristikleri azaltmaktadır [14, 15]. Üçlü NiTiNb ŞHA'lar üzerine araştırma olmasına rağmen, dörtlü NiTiNbTa alaşımı ve bunlara uygulanan termal iyileştirmeyi araştıran çalışmalar yok denecek kadar azdır.

Bu çalışmada NiTiNbTa alaşımı ark ergitme yöntemi ile üretildi, alaşıma farklı ısıl işlemler yapılarak faz dönüşüm sıcaklıkları ve termal aktivasyon enerjilerinin değişimi araştırıldı.

## 2. Materyal ve Yöntem

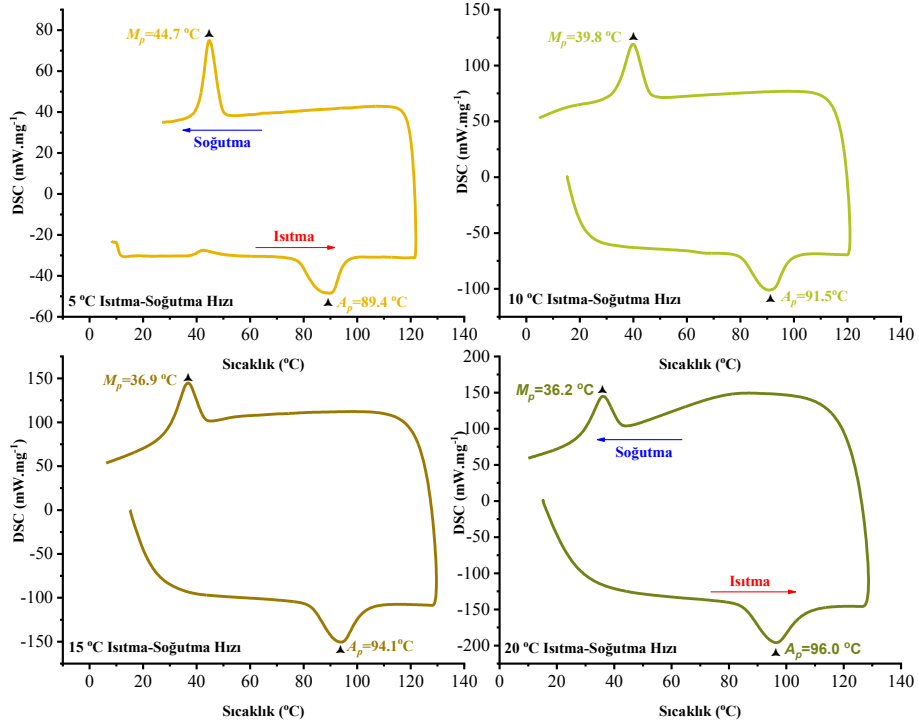
Bu çalışmada incelenen Ti<sub>50</sub>Ni<sub>27</sub>Nb<sub>20</sub>Ta<sub>3</sub> (% atomik) şekil hatırlamalı alaşım ark ergitme yöntemiyle üretildi. Ek olarak, ark ergitme işlemi alaşımın homojenliğini koruması için birkaç kez tekrarlandı. Alaşımı oluşturan metal tozları yaklaşık % 99,9 saflıkta seçildi. Hazırlanan alaşımlar sırası ile 700°C, 800°C ve 900°C'de 24 saat ısıl işleme tabi tutuldu. DSC (Differential Scanning Calorimeter) yardımıyla farklı sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş alaşımın dönüşüm sıcaklıkları araştırıldı. Faz dönüşüm sıcaklıklarını ve termal aktivasyon enerjilerini belirlemek için Perkin Elmer Sapphire marka DSC cihazı ile 5, 10, 15 ve 20 °C/dak. ısıtma ↔ soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde ısı akısı ölçümleri yapıldı.

## 3. Bulgular ve Tartışma

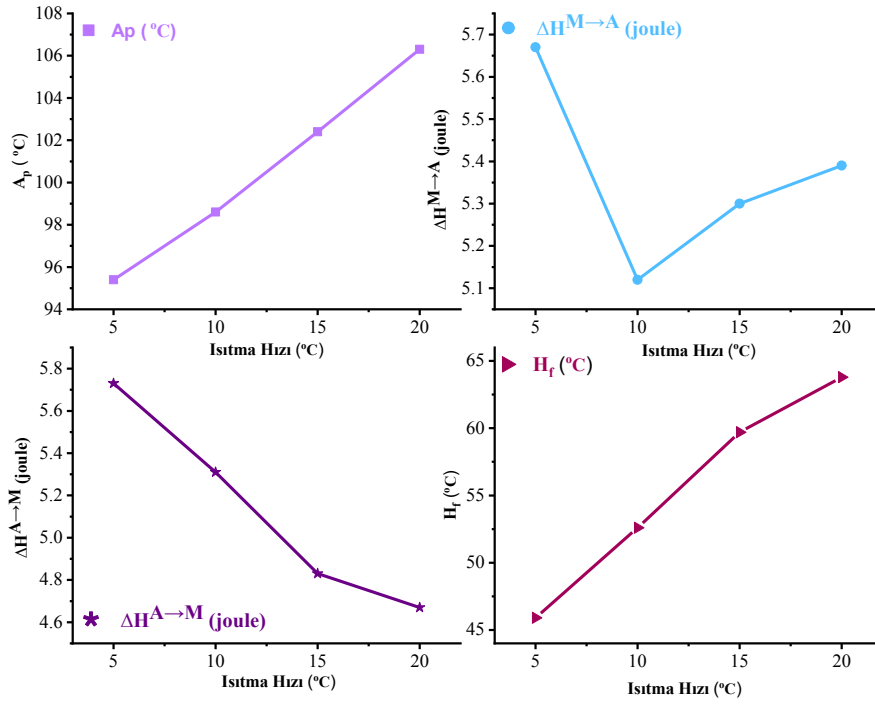
Dörtlü element içeren TiNiNbTa alaşımın termal özelliklerini araştırmak için farklı üç sıcaklıkta ısıl işlemlere tabi tutuldu. Alaşımın 700°C derecede 24 saat ısıl işlemden sonra farklı ısıtma-soğutma sonucu elde edilen DSC grafikleri Şekil 1 üzerinde ve grafiklerden elde edilen termal parametreler Tablo 1'de içerisinde verildi. Şekil 1 üzerinde alaşımın ısıl işlemden sonra alınan faz geçişlerinin B19'↔B2 olduğu görülmektedir. NiTi alaşımlarında B19' monoklinik, B2 kübik kristal yapıdadır [16-18]. DSC eğrileri ve Tablo 1 incelendiğinde ısıtma hızlarının artışı, alaşımın  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $A_p$  sıcaklıklarını arttırdığı, fakat  $M_s$  ve  $M_f$  sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra monoklinik kristal yapıdan kübik kristal yapıya geçiş için gerekli entalpi enerjisi  $\Delta H^{M \rightarrow A}$  artmaktadır. Soğutma esnasında, düz dönüşüm olarak da bilinen austenit yapıdan martensite yapıya geçiş için verilen enerji  $\Delta H^{A \rightarrow M}$  ise artan ısıtma hızına bağlı olarak azalmaktadır. Aynı ısıtma ve soğutma hızında gözlenen entropiler arasındaki farkın ise;  $\Delta H = \Delta H^{M \rightarrow A} - \Delta H^{A \rightarrow M}$  iç enerjilere harcandığı bilinir. Bu genellikle B19' yapıdan B2 yapıya geçişlerde iç sürtülmelere harcanan enerjidir [19]. Şekil 2'de verildiği gibi 700°C'de ısıl işleme tabi tutulan alaşımın ısıtma soğutma hızına bağlı değişen bazı termal parametreleri verilmiştir. Bu grafiklerden austenit fazın maksimumu olan  $A_p$  ve iki faz arasındaki sıcaklık farkı olan  $H_f$ 'nin ( $H_f = A_p - M_p$ ) artan ısıtma hızı ile arttığı görülmektedir.

**Tablo 1.** TiNiNbTa alaşımının 700°C'de ısıl işlemden sonra faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi.

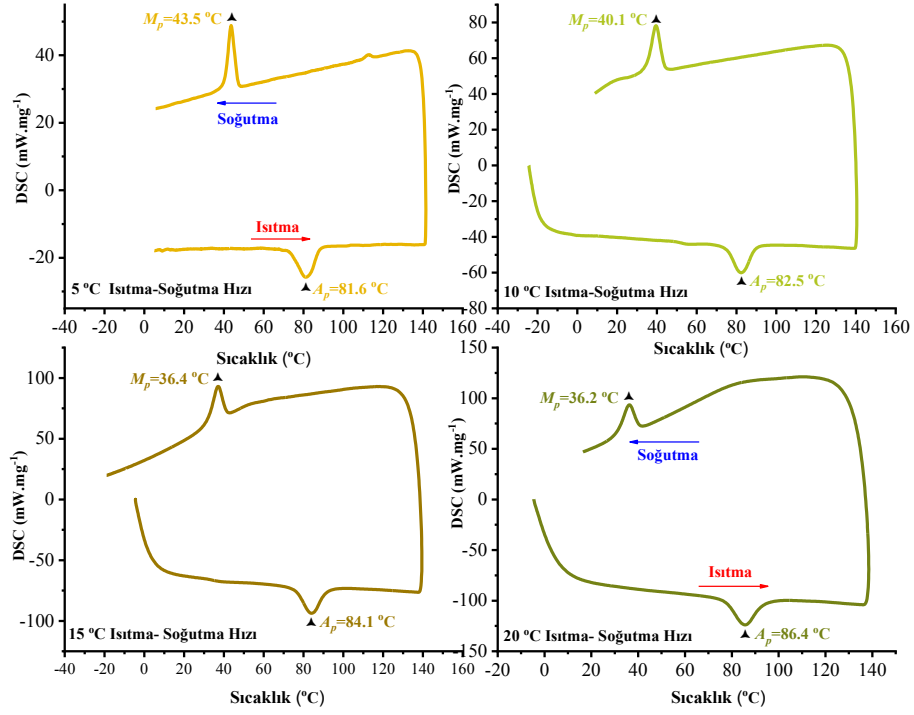
Isıtma- Soğutma Hızı (°C/dk)	$A_s$ (°C)	$A_f$ (°C)	$A_p$ (°C)	$M_s$ (°C)	$M_f$ (°C)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta H^{A \rightarrow M}$ (J/g)	$H_f$ (°C)
5	77,0	95,4	89,4	49,5	40,6	5,67	-5,73	45,9
10	79,6	98,6	90,7	46,0	33,9	5,12	-5,31	52,6
15	81,7	102,4	94,0	42,7	28,8	5,30	-4,83	59,7
20	84,4	106,3	96,5	42,5	28,5	5,39	-4,67	63,8



Şekil 1. TiNiNiTa alaşımının 700°C’de ısıl işlemden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği.



Şekil 2. TiNiNiTa alaşımının 700°C’de ısıl işlemden sonra farklı ısıtma hızına bağlı bazı termal parametrelerin değişim grafiği.

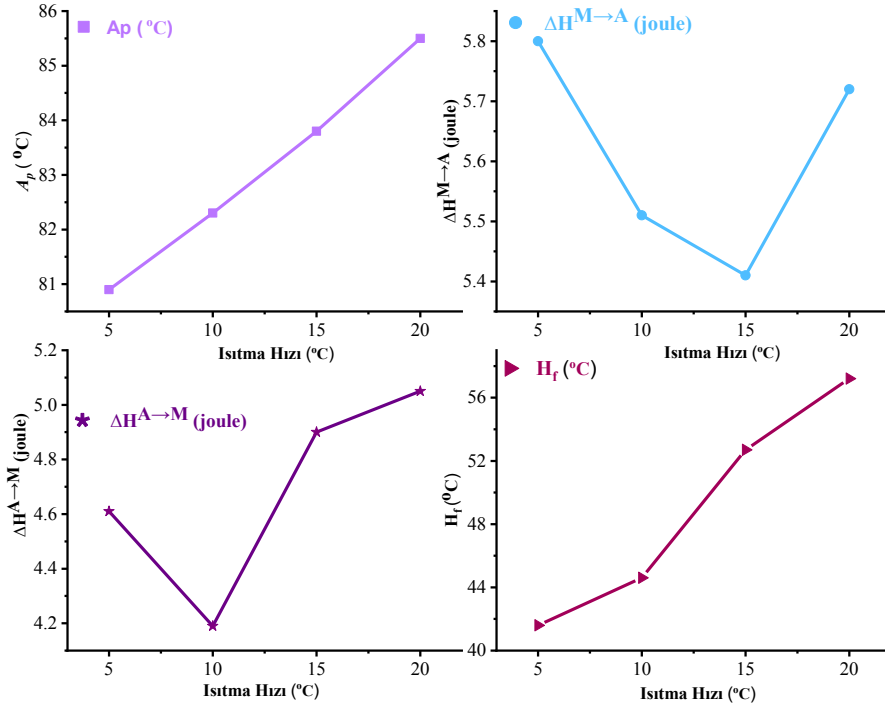


Şekil 3. TiNiNiTa alaşımının 800°C’de ısıl işleminden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği.

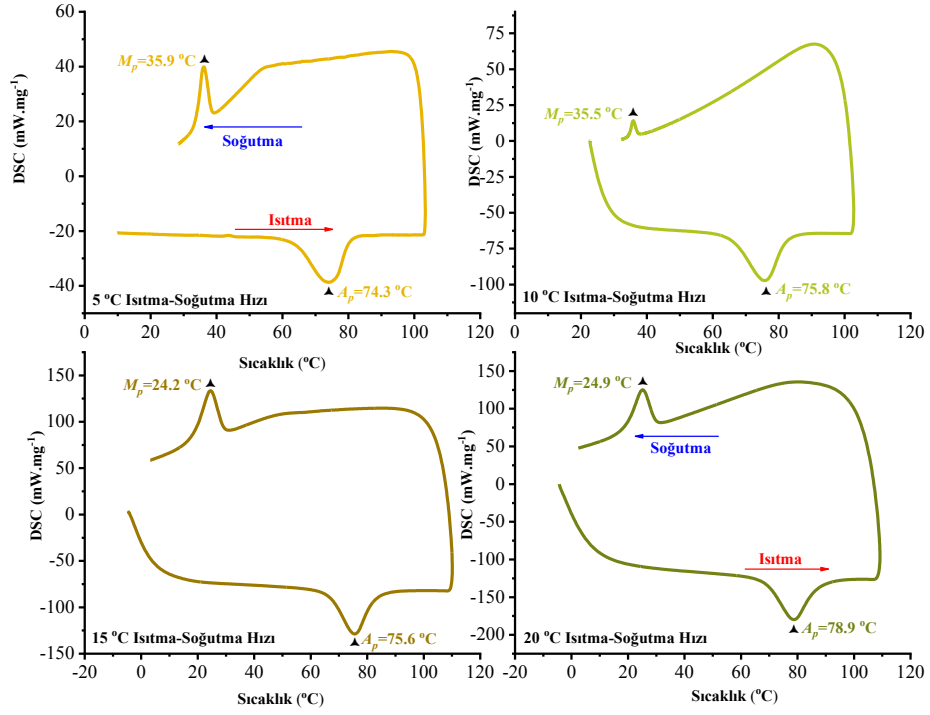
Şekil 3’de verildiği gibi TiNiNiTa alaşımının 800°C’de ısıl işleminden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği gösterilmiştir. Isıtma esnasında ters dönüşüm olarak da adlandırılan martensite fazdan austenite faza ve düz dönüşüm olarak bilinen austenit fazdan martensit faza geçiş eğrileri açıkça görülmektedir. Bu grafiklerden elde edilen termal parametreler Tablo 2 içerisinde verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde ısıtma hızlarının artışı, alaşımın  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $A_p$  sıcaklıklarını arttırdığı, fakat  $M_s$  ve  $M_f$  sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca, B19’ yapıdan B2 yapıya geçiş için gerekli entalpi enerjisi  $\Delta H^{M \rightarrow A}$  azalmakta ve  $\Delta H^{A \rightarrow M}$  enerjisi artmaktadır. Şekil 4’de görüldüğü gibi alaşımın histeresizi ısıtma-soğutma hızının artması ile arttığı açıktır.

Tablo 2. TiNiNbTa alaşımının 800°C’ de ısıl işleminden sonra faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi.

Isıtma-Soğutma Hızı (°C/dk)	$A_s$ (°C)	$A_f$ (°C)	$A_p$ (°C)	$M_s$ (°C)	$M_f$ (°C)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta H^{A \rightarrow M}$ (J/g)	$H_f$ (°C)
5	72,7	88,1	80,9	47,3	40,3	5,80	-5,87	40,8
10	75,3	89,5	82,3	44,0	34,2	5,48	-5,31	45,5
15	76,2	92,2	83,8	41,5	30,6	5,43	-4,84	50,7
20	77,3	94,2	85,5	40,8	30,1	5,25	-4,87	53,4



Şekil 4. TiNiNiTa alaşımının 800°C’de ısıl işlemden sonra farklı ısıtma hızına bağlı bazı termal parametrelerin değişim grafiği.

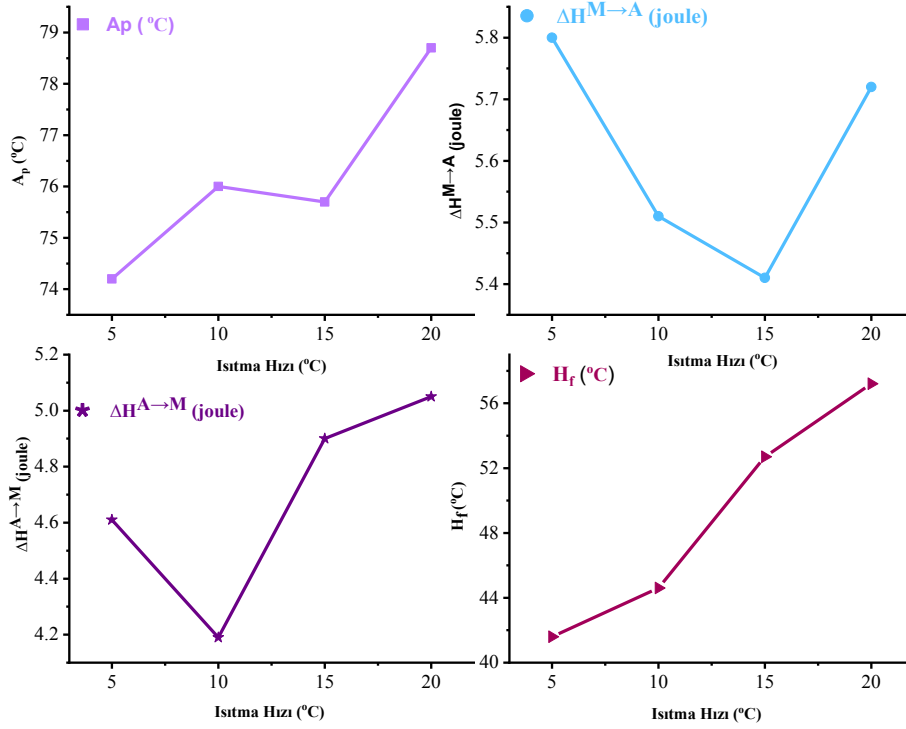


Şekil 5. TiNiNbTa alaşımının 900°C’de ısıl işlemden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği.

**Tablo 3.** TiNiNbTa alaşımının 900°C’de ısıl işleminden sonra faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi.

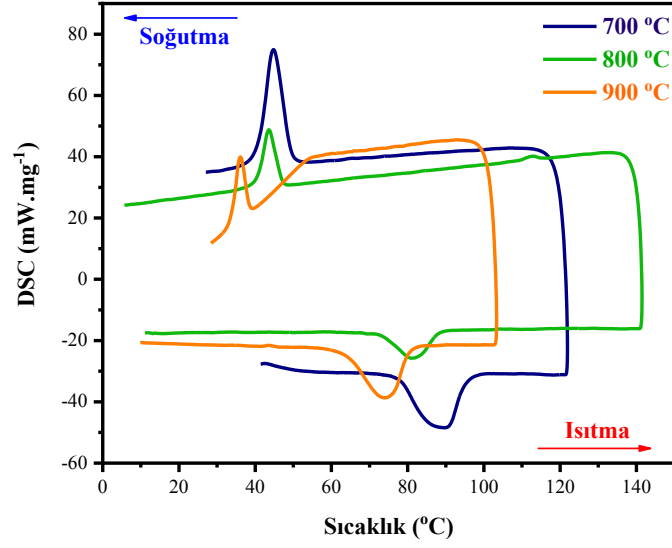
Isıtma-Soğutma Hızı (°C/dk)	$A_s$ (°C)	$A_f$ (°C)	$A_p$ (°C)	$M_s$ (°C)	$M_f$ (°C)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta H^{A \rightarrow M}$ (J/g)	$H_f$ (°C)
5	64,1	80,2	74,2	38,6	33,8	5,80	-4,61	41,6
10	66,3	82,1	76,0	37,5	34,7	5,51	-4,19	44,6
15	66,3	82,3	75,7	29,6	18,5	5,41	-4,90	52,7
20	68,8	87,3	78,7	30,1	19,0	5,72	-5,05	57,2

TiNiNiTa alaşımının 900°C’de ısıl işleminden sonra farklı ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafikleri Şekil 5 üzerinde, DSC eğrilerinden alınan termal parametreler ise Tablo 3 içerisinde verildi. Şekil 5 ve Tablo 3’de görüldüğü gibi termal iyileştirme (termal işlemler) ve ısıtma hızı alaşımın dönüşüm sıcaklıklarını etkilemiştir. Tablo 3 incelendiğinde ısıtma hızlarının artışı, alaşımın  $A_s$ ,  $A_f$ ,  $A_p$  sıcaklıklarını artırdığı, fakat  $M_s$  ve  $M_f$  sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca hem martensite fazdan austenite faza hem de austenite fazdan martensite faza geçiş için gerekli enerjisi entalpileri değiştirmektedir. Ayrıca ısıtma soğutma hızı dönüşüm histeresizini de arttırmaktadır. Bu değişimler Şekil 6’ da görüldüğü üzere daha belirgindir.

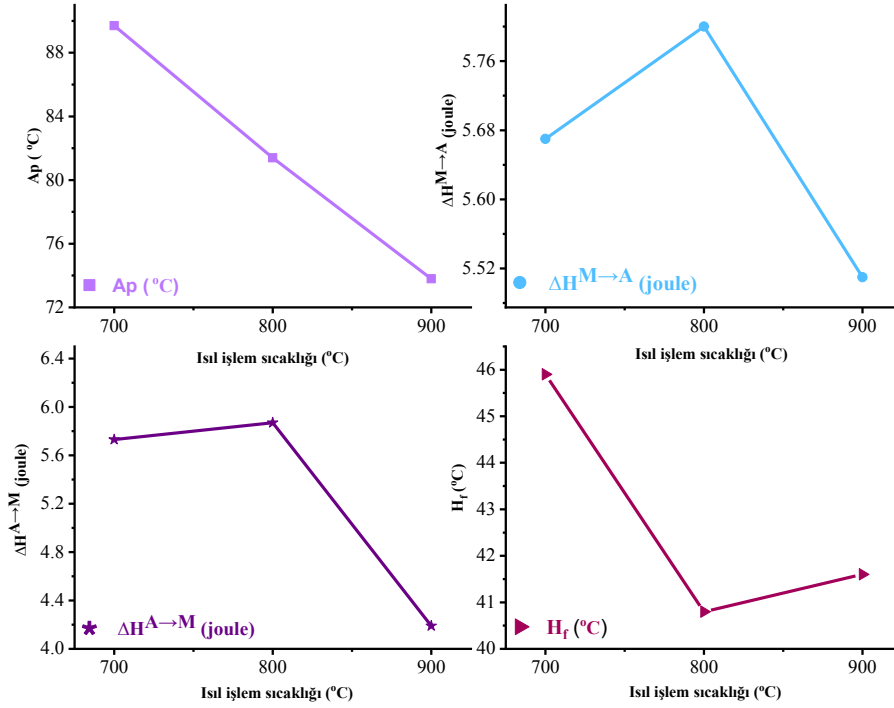


**Şekil 6.** TiNiNiTa alaşımının 900°C’de ısıl işleminden sonra farklı ısıtma hızına bağlı bazı termal parametrelerin değişim grafiği.

TiNiNiTa alaşımın 5°C/dak ısıtma-soğutma hızı ile alınan DSC eğrileri Şekil 7’de üzerinde verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde ısıl işlem sıcaklığının artması dönüşüm sıcaklıklarını azalttığı görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 8 incelendiğinde  $A_p$ ,  $\Delta H^{M \rightarrow A}$ ,  $\Delta H^{A \rightarrow M}$  ve  $H_f$  termal parametrelerinin ısıl işleme duyarlı olduğu ve ısıl işlem sıcaklığı artışı bu parametreleri de azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 7. TiNiNbTa alaşımının 700°C, 800 °C ve 900 °C’ de ısıtma-soğutma hızında alınan DSC grafiğinin karşılaştırılması.



Şekil 8. TiNiNbTa alaşımının 700°C, 800 °C ve 900 °C’ de ısıtma-soğutma hızında alınan DSC eğrilerinden elde edilen bazı termal parametrelerinin karşılaştırılması.

Başka bir termal parametre olan termal aktivasyon enerjisini hesaplamak için üç yöntem vardır. Bunlar Kissinger [20], Ozawa [21] ve Takhor [22] yöntemleridir. Bu yöntemler farklı ısıtma hızı ile bu ısıtma hızına bağlı elde edilen  $A_p$  sıcaklıkları tespit edilir. Aşağıdaki formüllerden faydalanılarak termal aktivasyon enerjileri hesaplanır [23].

$$\frac{d(\ln(\beta/A_p^2))}{d(1/A_p)} = -\frac{E}{R} \quad \text{Kissinger} \quad (1)$$

$$E \cong -2.19R - \frac{d \log \beta}{d(1/A_p)} \quad \text{Ozawa} \quad (2)$$

$$\frac{d(\ln(\beta))}{d(1/A_p)} = -\frac{E}{R} \quad \text{Takhor} \quad (3)$$

Burada E termal aktivasyon enerjisi, R evrensel gaz sabiti (R=8314 J/mol), β ısıtma hızı ve A<sub>p</sub> austenite fazın minimumudur. Farklı ısıl işlemlerin termal aktivasyon enerjilerini hesaplamak için bu iki yöntemle hesaplanmıştır ve Tablo 4 içerisinde verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde termal aktivasyon enerjisi ısıl işlem sıcaklığı yükseldikçe arttığı görülmüştür.

**Tablo 4.** TiNiNbTa alaşımın farklı ısıl işlemlerden sonra hesaplanan termal aktivasyon enerjileri ve ortalaması.

Yöntem	700 °C'de ısıl işlemler numune	800 °C'de ısıl işlemler numune	900 °C'de ısıl işlemler numune
E <sub>Kissinger</sub> (kJ/mol)	190,5	305,8	278,0
E <sub>Ozawa</sub> (kJ/mol)	186,9	296,5	269,9
E <sub>Takhor</sub> (kJ/mol)	196,6	311,7	283,8
E <sub>ortalama</sub> (kJ/mol)	191,3	304,7	277,2

#### 4. Sonuç

Şekil hatırlamalı alaşımlar mekanik, ısı, elektriksel-kimyasal işlemler ve çevresel şartlar altında üstün termomekanik ve termo elektriksel davranış sergilerler. Faz dönüşüm sıcaklıkları ise genellikle mikroyapı farklılıkları ve malzemeye uygulanan farklı ısıl işlemlerden etkilenebilir. Faz dönüşümleri (martensit ve austenit), şimdilerde şekil hatırlama özelliğine sahip yeni malzemelerin yapımında kullanılmalarından dolayı büyük teknolojik önem taşımaktadır. Bu özelliklerin değiştirilmesi sonucunda otomobil, havacılık, biyomedikal ve robot endüstrisi gibi farklı sistemlerde yeni alaşım üretmek yerine ısıl işlemler uygulayarak, alaşımın fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirerek bu sistemler kullanılabilir hale gelebilir. TiNiNbTa şekil hatırlamalı alaşımda termal işlemlerin termal parametreleri üzerine etkileri araştırılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar öne çıkmıştır.

- Isıl işlem sıcaklığı faz dönüşüm sıcaklıkları ve dönüşüm entalpisi etkiledi. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça austenite faz dönüşüm sıcaklığı, martensite faz dönüşüm sıcaklığı, her iki fazın dönüşüm entalpisi, faz dönüşüm histeresizi belirgin bir şekilde azaldı.
- Yapılan farklı ısıl işlemlerde, alaşımın DSC sonuçlarında ısıtma hızlarının artması austenite faz dönüşüm sıcaklığı, austenite faz dönüşüm entalpisi ve faz dönüşüm histeresizini artırırken, martensite faz dönüşüm entalpisini azalttı.
- Yapılan ısıl işlemler termal aktivasyon enerjisini büyük ölçüde etkiledi. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça termal aktivasyon enerjisi arttığı belirlendi.

#### Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) FF 23.03 projesi ile desteklenmiştir. F.D, fikir sahibi, E.B. deneyleri gerçekleştirdi F.D. ve E.B. sonuçları yorumladı, F.D makaleyi yazdı.



**Kaynaklar**

- [1] Patoor E, Lagoudas D.C, Entchev P.B, Brinson L.C and Gao X. Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals, *Mechanics of materials* 2006;38:391-429.
- [2] Nishiyama Z. *Martensitic transformation*. Elsevier: Academic Pres, 2012.
- [3] Liu J. and Y Guo. Process capability of wire-edm of NiTi shape memory alloy at main cut and trim cut modes, *Procedia Manufacturing* 2015;1: 904-914.
- [4] Dagdelen F. and Y Aydogdu. Transformation behavior in NiTi–20Ta and NiTi–20Nb SMAs, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2019;136: 637-642.
- [5] Piao M, Miyazaki S, Otsuka K. Characteristics of deformation and transformation in Ti44Ni47Nb9 shape memory alloy, *Materials Transactions JIM* 1992; 33: 346-353.
- [6] Zhang C.S, Zhao L.C, Duering T.W. and Wayman C.M. Effects of deformation on the transformation hysteresis and shape memory effect in a Ni47Ti44Nb9 alloy, *Scripta Metallurgica et Materialia* 1990;24:1807-1812.
- [7] Zhang C.S, Wang Y.Q, Chai W. and Zhao L.C. The study of constitutional phases in a Ni47Ti44Nb9 shape memory alloy, *Materials Chemistry and Physics* 1991;28:43-50.
- [8] He X.M, Rong L.J, Yan D.S. and Li Y.Y. Temperature memory effect of Ni47Ti44Nb9 wide hysteresis shape memory alloy, *Scripta materialia* 2005;53:1411-1415.
- [9] Sui J.H, Gao Z.Y, Li Y.F, Zhag Z.G. and Cai W. A study on NiTiNbCo shape memory alloy, *Materials Science and Engineering: A* 2009;508: 33-36.
- [10] Bhagyaraj J, Ramiah K.V, Saikrishma C.N. and Bhaumik S.K. Behavior and effect of Ti2Ni phase during processing of NiTi shape memory alloy wire from cast ingot, *Journal of alloys and compounds* 2013;581: 344-351.
- [11] El-Bagoury N. Comparative study on microstructure and martensitic transformation of aged Ni-rich NiTi and NiTiCo shape memory alloys, *Metals and Materials International* 2016; 22: 468-473.
- [12] Eggeler G, Allafi J.K, Gollerthan S, Somsen C, Schmahl W. and Sheptyakow D. On the effect of aging on martensitic transformations in Ni-rich NiTi shape memory alloys, *Smart materials and structures* 2005;14: 186.
- [13] Dovchinanchig M, Zhao C.W, Zhao S.L, Meng X.K, Jin Y.J. and Xing Y.M. Effect of Nd addition on the microstructure and martensitic transformation of Ni-Ti shape memory alloys, *Advances in Materials Science and Engineering* 2014;6:489-701.
- [14] Zhao Y.N, Jiang S.Y, Zhang Y.Q. and Liang Y.L. Influence of Fe addition on phase transformation, microstructure and mechanical property of equiatomic NiTi shape memory alloy, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 2017;30: 762-770.
- [15] Kök M, Zardawi H.S.A, Qader I.N and Kanca M.S. The effects of cobalt elements addition on Ti2Ni phases, thermodynamics parameters, crystal structure and transformation temperature of NiTi shape memory alloys, *The European Physical Journal Plus* 2019;134:197.
- [16] Balci E. and Dagdelen F. Thermal, structural properties and potential dynamic corrosion study of Ti-27Ni-21Nb-2Ta SMA, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions A: Science* 2022;46: 353-359.
- [17] Balci E. and Dagdelen F. The comparison of TiNiNbTa and TiNiNbV SMAs in terms of corrosion behavior, microhardness, thermal and structural properties, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2022;147:10943-10949.
- [18] Balci E, Dagdelen F, Qader I.N and Kök M. Effects of substituting Nb with V on thermal analysis and biocompatibility assessment of quaternary NiTiNbV SMA, *The European Physical Journal Plus* 2021;136: 145.
- [19] Ercan E, Dagdelen F, Kök M. and Balci E. Investigation of Thermodynamic Properties of Ni30Ti20Cu20 Shape Memory Alloy, *Bitlis Eren University Journal of Science* 2019; 8: 1194-1202.
- [20] Kissinger H.E. Reaction kinetics in differential thermal analysis, *Analytical chemistry* 1957;29:1702-1706.
- [21] Ozawa T.A. New method of analyzing thermogravimetric data, *Bulletin of the chemical society of Japan* 1965; 38:1881-1886.
- [22] Takhor R. Advances in nucleation and crystallization of glasses, *American Ceramics Society Columbus* 1971;166: 13-23.
- [23] Mohammed S.S, Balci E, Dagdelen F and Saydam S. Comparison of Thermodynamic Parameters and Corrosion Behaviors of Ti50Ni25Nb25 and Ti50Ni25Ta25 Shape Memory Alloys, *Physics of Metals and Metallography* 2022;123: 1427-1435.



## Investigation of Urban Transformation Process, Methods, and Techniques: Elazığ Province Sample

Belkıs ELYİĞİT<sup>1\*</sup>, Cevdet Emin EKİNCİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences,  
Firat University, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, Firat University, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> belkiselyigit@hotmail.com, <sup>2</sup> cee@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 10/09/2023;

Kabul/Accepted: 25/02/2024)

**Abstract:** This study aims to examine and present the general results of the urban transformation studies methods and techniques applied in the province of Elazığ after the Sivrice earthquake. The study used a descriptive approach method within the scope of qualitative research. Urban transformation project data applied in risky areas were obtained from technical analysis and interviews. The research covers the results of urban transformation in risky areas of Elazığ province. Cleaning, renewal, and post-disaster transformation methods were used in urban transformation works in risky areas. The general situation after the earthquake has revealed some weaknesses in selecting methods and techniques for urban transformation applications. As a result of urban transformation practices, bioharmological buildings that are more compatible with the current earthquake legislation, with a stronger carrier system, more comfortable, and in terms of user identity and purpose of use, are offered to the use of beneficiaries.

**Keywords:** Elazığ, Urban Transformation, Urban Transformation Process, Urbanization, Risky Area

### Kentsel Dönüşüm Süreci, Yöntem ve Tekniklerin İncelenmesi: Elazığ İli Örnekleme

**Öz:** Bu çalışma, Sivrice depremi sonrası Elazığ ilinde uygulanan kentsel dönüşüm çalışmaları yöntem ve tekniklerinin genel sonuçlarını inceleyerek sunmayı amaçlamaktadır. Araştırmada nitel araştırma kapsamında betimsel yaklaşım yöntemi kullanılmıştır. Riskli alanlarda uygulanan kentsel dönüşüm proje verileri teknik analiz ve görüşmelerden elde edilmiştir. Araştırma, Elazığ ilinin riskli bölgelerindeki kentsel dönüşümün sonuçlarını kapsamaktadır. Riskli bölgelerdeki kentsel dönüşüm çalışmalarında temizlik, yenileme ve afet sonrası dönüşüm yöntemleri kullanıldı. Deprem sonrası genel durum, kentsel dönüşüm uygulamalarına yönelik yöntem ve tekniklerin seçiminde bazı zayıflıkları ortaya çıkarmıştır. Kentsel dönüşüm uygulamaları neticesinde güncel deprem mevzuatıyla daha uyumlu, daha güçlü taşıyıcı sistemli, daha konforlu, kullanıcı kimliği ve kullanım amacı bakımından da biyoharmolojik binalar hak sahiplerinin kullanımına sunulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Elazığ, Kentsel Dönüşüm, Kentsel Dönüşüm Süreci, Kentleşme, Riskli Alan

### 1. Introduction

Cities are transformed due to reasons such as industrialization and migration specific to the urban development process, as well as natural disasters, human-induced positive or negative actions, and war. This transformation often destroys urban areas. In this context, areas subject to urban transformation have become obsolete or are outside the development plan [1-3]. In addition, areas in need of urban transformation may arise as a result of natural disasters such as earthquakes, floods, and fires; urban transformation practices are carried out to eliminate the deterioration that occurs after a natural disaster or to minimize the damage that may occur before a natural disaster [1]. Urban transformation is defined as the demolition of unlicensed buildings and the creation of planned mass settlement areas [4]. Urban transformation is also carried out to stop the physical destruction in cities and make the cultural fabric sustainable, revitalize the economy in urban areas, increase the quality of life, and ensure the participation of all segments of the population [5]. The concept of transformation is the state of changing the risky area or structure from its current state to a different state [6]. In our country, after the building demolitions and loss of life following the Duzce and Golcuk Earthquakes in 1999, the issue of urban transformation came to the agenda. It became one of the most discussed topics. After this date, urban transformation projects began to be developed and implemented to minimize natural disaster risks, transforming unplanned urbanization areas and safe construction against a possible natural disaster that will occur again. In addition to the new local government laws

\* Sorumlu yazar: [belkiselyigit@hotmail.com](mailto:belkiselyigit@hotmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-2556-1862, <sup>2</sup> 0000-0002-7114-4832

that give powers to local governments regarding urban transformation within the framework of the legislation, these practices have been put into practice by issuing legal regulations and many regulations on many issues such as natural disaster risks, eliminating unhealthy residential areas of cities and increasing economic vitality in these regions [7].

There are two methods used in urban transformation projects. These are individual urban transformation methods and public urban transformation methods. The public urban transformation method is the transformation and rehabilitation of areas that do not allow a healthy and safe urban life, both in infrastructure and superstructure areas. Recycling of risky buildings in these regions is done by demolishing them and building solid, earthquake-resistant buildings in their place. In this context, it is aimed to identify risky structures located in risky areas, demolish these structures, and build buildings by the new zoning legislation. In individual urban transformation applications; owners of occupied title deeds, floor easement title deeds, and shared title deeds within or outside the risky area carry out the transformation of their buildings by applying to the individual urban transformation method [8].

It is seen that public urban transformation methods are implemented within the framework of legislation. When the literature is examined, there are 11 application methods in public urban transformation projects [9-11]. These methods are protection, integration, renewal, rehabilitation, regulation, reanimation, redevelopment, cleaning, refreshing, gentrification, and development by filling the gaps [1, 5-7, 12-17].

- **The protection** method is evaluated within the scope of studies aimed at integrating the urban texture with contemporary life and reintroducing it to the people living in the city. It is taking steps to prevent an existing area or social structure from disappearing due to environmental conditions. Importance is given to harmonizing contemporary life with the urban texture and making cultural assets more useful for the people living there. The characteristics of the area are preserved or very limited changes are made [12].
- **The integration** method aims to create a rich environment by adding new buildings next to the existing buildings integrated as a result of regulating the physical conditions of historical buildings that have not lost their original qualities as a result of urban rehabilitation and preserving the urban identity [13].
- **The renewal** method is the removal and reconstruction of all or part of the buildings in areas where it is not possible to improve the living and health conditions in terms of both the settlement layout and the condition of the existing buildings and to raise the living standards by restructuring the urban space. It is especially applied in slum areas. It is aimed to change the obsolete urban structure in these regions [18].
- **The rehabilitation** method includes the principles of partial renewal of urban collapsed areas and the repair and restoration of the old urban fabric while preserving the existing structure. Urban rehabilitation can also be defined as restoration works in cases where the original qualities of cities are not damaged. With the urban rehabilitation method, all formations that harm the original character of the city are cleared. In practice, the intervention is physically intervened on the exterior of the buildings, not on their structure. The aim is to improve deteriorated conditions [19].
- **The regulation** method is a type of forward-looking public action that aims to establish a relationship between the functions of the settlement and land use to prevent the spontaneous development of a city, a town, or a part of a location, and to shape this development for the benefit of society [19]. Regulation is achieved by taking forward-looking steps. There is no practice here as demolishing and rebuilding. There are all of the legal/administrative applications. The aim is to impose restrictions in some regions to prevent them from experiencing problems in the coming years. In other words, unwanted growth of the city is prevented, and guidance is given to ensure the positive development of the city.
- **The reanimation** method can be defined as the elimination and modification of the factors that cause the collapse in cities or parts of cities that are in the process of physical collapse in economic, physical, and socio-cultural aspects, and revitalization by bringing them back to life. It is to move away from space-oriented renewal and replace it with an approach that produces social, economic, and environmental problems with new solutions. Revitalization aims to revitalize the area and add it to the city as a whole by addressing the problems experienced in collapsed areas and finding solutions as a result of identifying the sources of the problems [20].
- **The redevelopment** method is defined as the improvement of buildings in terms of life and health and the redevelopment of regions. The redevelopment action, which is also expressed as the demolition of residences in a new design scheme of the city part, aims to maximize the use of the land [16].
- **The cleaning** method is defined as the removal of unhealthy qualities of houses and other buildings in areas where low-income groups live [21]. In other words, it is the elimination of unsanitary conditions in houses and similar structures located in places where low-income people live.

- **The refreshing** method refers to the revitalization of historical areas through the use of landscape elements and urban furniture, which play an important role in creating the urban image and a unique character of the city. The aim is to revitalize historical areas. Landscaping materials and urban furniture are used extensively here. Great importance should be given to ensuring that the landscape materials and urban furniture in question reflect the urban image and character of the city [22].
- **The gentrification** method is the rehabilitation of the social structure in areas that have lost their social-cultural and aesthetic importance, have fallen into disrepair, and whose physical environment has been damaged. The difference between gentrification and other methods has emerged as a result of urban transformation practices. In other words, the class and spatial separation of depression areas can, in a sense, be defined as inter-layer displacement movement [23].
- **The Development by filling gaps method** is the addition of new activities and buildings to the existing texture in a region [24]. It can be defined as development by refilling existing empty lands or abandoned areas in the city. It can be said that these areas, which have become collapsed areas where slums and unplanned urbanization have increased, are transformed by opening new residences or workplaces.

Some techniques are also used in urban transformation projects. These are the consensus process components and the Abelson technique [4-18, 23, 25, 26]. The reconciliation process components technique aims to create a culture of reconciliation with broad participation during the implementation process and to increase the level of participation [1]. According to this practice, it is necessary to create a culture of consensus with broad participation in the planning and project development decision process and increase participation. To increase the level of participation in the reconciliation process; "Information", "Awareness", "Meeting", "Expectation", "Uncertainty", and "Adoption" components are gaining importance.

- **Information process component:** The project implementer must ensure that uncertainties are eliminated by sharing accurate and timely information with the parties directly and indirectly affected by the project. The information process covers topics such as project justification, determination criteria of the project area, planning principles, project approach and model, problems and opportunities, legal process, reconciliation process, sharing approach, market conditions, urban risks, plan and project documents, and legal documents [26].
- **Awareness process component:** Awareness-raising activities should be carried out by the parties, especially for the property owners or tenants who are primarily affected by the project, about the innovations, opportunities, and gains that the project will bring [27].
- **Meeting process component:** In comprehensive transformation projects, the level of participation should be increased, and bilateral and multiple meeting environments should be created where all parties in the project development process will come together to decide on all decisions from design to implementation [26, 27].
- **Expectation process component:** Establishing the delicate balance between "individual interest" and "social interest" among the parties directly or indirectly affected by the project, including the municipality, investors, property owners, tenants, and non-governmental organizations, and the management of the expectations of the other party from the other party. The most fundamental question to achieve balance is to what extent and how the public/society will share in the value created in the project [27].
- **Uncertainty process component:** As a result of various reasons, decisions cannot be taken on time decisions cannot be implemented, and problems arise, especially for those living in the project area and property owners. To eliminate uncertainties, authority should be shared, monitoring and evaluation methods should be developed, and political determination should be demonstrated [28].
- **Adoption process component:** Parties are involved in issues such as policies, strategic goals, vision, planning and design principles, participation approach, consensus principles, strategy and action plan, strategic social plan, bureaucracy approach, political determination in all decision processes, from the project approach to the sharing of the resulting value. It is expected to be determined to adopt [27].

To achieve consensus, basic questions of how new living spaces will be created, with whom the projects will be carried out, who will finance the project, and how the created value will be shared must be answered. Nowadays, economic and social development and locally focused approaches should be taken as a priority when developing projects. The method of reconciliation process components should be included in the process of reducing the tension that arises in public-oriented projects and taking into account the spatial, social, and economic dimensions of comprehensive transformation. Ankara Orange Blossom Valley, Ankara Dikmen Valley, Istanbul Tarlaşaşı 1st

Stage Renewal Project, Istanbul Kartal New Center Project, and Istanbul Cendere Valley Urban Transformation Projects can be given as examples of reconciliation projects [26, 27].

The Abelson urban transformation technique employs different methods to guarantee public involvement in urban transformation projects and gather their feedback on these projects [19]. These methods can be categorized into two groups: public participation and public consultation. [1, 2, 4-7, 19, 29].

- **Public participation techniques** are techniques that enable local people to actively participate in decision-making processes through deliberative means. Public juries, public panels, planning cells, consensus conferences, and deliberative voting are the main public participation techniques.
- **Public consultation techniques** are techniques used by central government, local governments, and private sector organizations to measure the reaction of citizens to the decisions they make. These techniques; focus groups, consensus-building exercises, surveys, public hearings, open invitations, advisory boards, social planning, vision development, referendum, structured value referendum, information, and solicitation of criticism [25, 29].

When we look at the literature, urban transformation projects are being prepared in our country and around the world to transform urban areas and reduce disaster risk. Urban transformation projects should be carried out in cities where urbanization planning was not well organized in the past and where rapid and incomplete urbanization took place. It is important to select and prioritize appropriate urban transformation projects in cities where there are multiple problems such as earthquake risk, flood risk, and landslide risk. In this context, many researchers have examined urban transformation processes for various purposes.

Buildings in cities require high amounts of energy to maintain physical comfort, which leads to environmental problems due to the increasing demand. To address this issue, Chang, Yoshida, Castro-Lacouture, and Yamagata proposed a building conversion strategy that utilizes a Bayesian multilevel modeling approach of buildings to achieve energy efficiency while maintaining thermal comfort [30].

Sabeeh Lafta, Antón García, Venus Suleiman, Salah Lafta, and Khalid Safa suggest that urban restoration and preservation of historical buildings should be performed in compliance with legislation and through techniques that maintain urban identities and cultural heritage. Furthermore, they emphasize the importance of raising public awareness about such practices [31].

Zhou et al. argued in their study that the urban designers' transformation method used in the renovation of Nantou Village was a more balanced solution than the traditional demolition, reconstruction, and renewal method employed by the regional government. The designers considered various conditions related to the urban background, historical context, and spatial rights of the village residents while developing their proposal [32].

Hong conducted a study on the Sewoon Renewal Promotion Project and Kwun Tong Town Center Project, which are urban renewal projects in Seoul and Hong Kong. The study aimed to identify problems related to the participation of urban residents and to diversify the ways of active participation of the public in these projects. The study offers specific measures that can be implemented immediately to encourage resident participation. It also suggests practical ways to benefit from resident participation at all stages of the project [33].

Moloney and Ralph conducted a study on the low-carbon policy actions taken by the Australian government to promote sustainable urban development. They carried out field studies in Melbourne and concluded that the policy was not effective in practice and could not provide a viable solution. However, they recommended the use of infrastructure and walking paths instead of public transportation in projects aimed at reducing carbon emissions in urban areas [34].

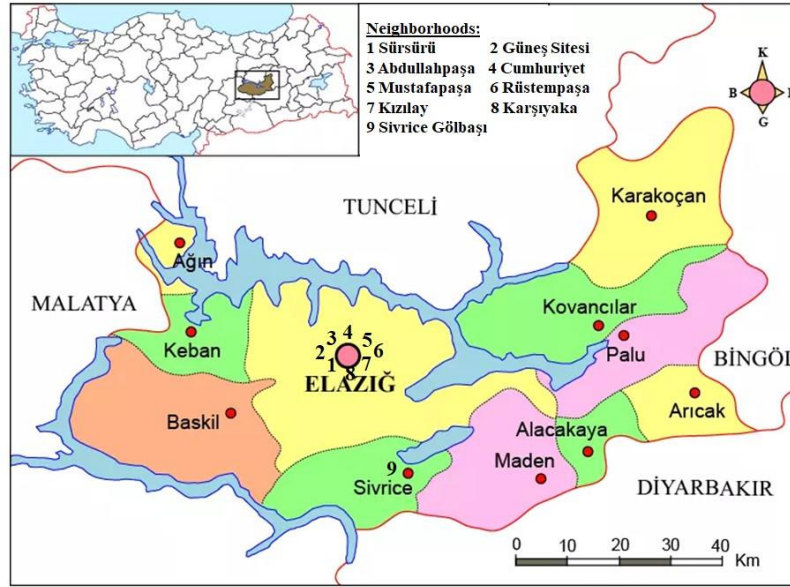
In Dr. Ekinci's proposed model, the engineering and architectural features of buildings can be easily determined during the planning, designing, and implementation stages of the urban transformation process. This model uses 12 main criteria and 600 inquiry questions to determine the engineering properties of buildings and their certificate classes. Additionally, 12 main criteria and 300 inquiry questions are used to determine the architectural properties of buildings. By doing so, the current status of the produced buildings in terms of user identity and purpose of use is clarified [35].

The purpose of this study is to investigate and present an overview of the methods and techniques used in urban transformation projects carried out in Elazig Province and Sivrice County, particularly after the 2020 Elazig-Sivrice earthquake. The study aims to evaluate the outcomes of the decisions made during the process as a whole.

## 2. Research Method

The focus of this study is the city of Elazig, particularly the areas that are at risk of earthquakes. The purpose of this qualitative research is to examine the results of urban transformation implementation in these areas through a field study. The study utilizes a descriptive approach, which involves the use of observation, interview, and

documentary scanning techniques. The observation technique is used to examine the physical characteristics of the buildings, while the interview technique involves gathering the opinions of building rights holders and users. The documentary scanning technique involves interpreting the reflections of literature information used in practice. To compare the literature information, the project technical documents obtained from the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change (MEUCC) and Elazig Municipality (EM) were used. The research sample consists of nine areas that are at risk of earthquakes, located in the center and neighborhoods of Elazig province, which have been included in the scope of urban transformation. These areas are the Karşıyaka Neighborhood, Cumhuriyet Neighborhood, Abdullahpaşa Neighborhood, Mustafapaşa Neighborhood, Rüstempaşa Neighborhood, Sürsürü Neighborhood, Kızılay Neighborhood, Güneş Site, and Gölbaşı Neighborhood of Sivrice Country (Figure 1).



**Figure 1.** Distribution of urban transformation projects on the map of Elazig

### 3. Findings and Discussion

On January 24, 2020, a 6,8  $M_w$  earthquake hit Elazig, causing severe damage to buildings that were constructed before 2006. The unplanned urbanization and the earthquake accelerated the urban transformation process throughout the Elazig province. The urban transformation practices implemented in Elazig played an important role in reducing the risk of damaged buildings during earthquakes and renovating earthquake-resistant buildings.

According to the following is a report from the Fırat University Building and Concrete Application and Research Center, numbered 2020/D001 following the Sivrice earthquake that occurred on January 24, 2020, it was discovered that out of approximately 51792 buildings located in Elazig city center, 37290 were either undamaged or slightly damaged, while 1554 were moderately damaged, 6763 were severely damaged, and 6185 were in urgent need of demolition [36]. The MEUCC announced that the data changed after the Kahramanmaraş Pazarcık and Elbistan earthquakes on February 6, 2023. The main reason why the situation did not become worse during urban transformation works was that the implementation was completed after the Sivrice earthquake [37].

Some of the buildings in the Karşıyaka Neighborhood, located in the center and the eastern entrance of Elazig, are adobe structures and some are officer residences built in 1969. The Karşıyaka Neighborhood urban transformation project had been carried out within the scope of Municipality Law No. 5393 and redevelopment, renewal, and cleaning methods were applied (Table 2). The project started in 2014 and was completed in 2020. Renovation work has been carried out on the officers' lodges located in the risky area, but no renovation work has been carried out on the adobe buildings. An area of 50.30 hectares was declared as a risky area, but the project was implemented in an area of 6 hectares. The number of demolished independent buildings is 468. In addition, the demolished independent building type is reinforced concrete and the number of floors is five. The project was carried out in cooperation with Elazig Municipality and TOKİ. The municipality took part in the planning, design,

and administrative aspects of the project, and TOKİ carried out the construction and construction phases. The flats within the scope of the project are designed as 2+1 and 3+1. After construction, the number of independent units is 439 and the number of workplaces is 29. The constructed buildings are four-story, five-story, and six-story (Table 1). Although the consensus was at a moderate level in the first phase of the Karşıyaka Neighborhood application, it is seen that the consensus decreased towards the end of the application, however, public participation was very low in the first phase and there was no participation at the end of the application (Table 3).

The application area in the Cumhuriyet Neighborhood urban transformation project was declared as a disaster risk area. The declared risky area is 18.84 hectares. As a result of the failure to reach an agreement between some of the right holders in the risky area and the municipality, the transformation in the area could not be made, instead the treasury land close to the risky area was transferred to the municipality and the land was declared as a reserve construction area. The area of this reserve structure is 2.84 hectares. The redevelopment method was applied in the Cumhuriyet Neighborhood (Table 2). There are 28 reinforced concrete and 110 masonry structures in the risky area. It is seen that there are one-story, two-story, and three-story buildings in the area. Three-story buildings are located in the eastern part of the area, and two-story buildings are densely located in the western part of the area. The project started in 2014 and was completed in 2020. 277 independent units were built in the reserve building area. The buildings constructed are nine-story reinforced concrete. The design, planning, and reconciliation process of the project was undertaken by the Municipality, and the construction phase was carried out by TOKİ (Table 1). Although the consensus was at a moderate level in the first phase of the Cumhuriyet Neighborhood application, it is seen that the consensus decreased towards the end of the application, however, public participation was very low in the first phase and there was no participation at the end of the application (Table 3).

An area of 32.99 hectares in the Abdullahpaşa Neighborhood had been declared a risky area within the scope of Law No. 6306 by the decision of the President in 2020. After the 6.8  $M_w$  earthquake in Elazig, the project application area was declared as a risky area. The post-earthquake transformation project was carried out in stages and these stages were implemented as 1st, 2nd, 3rd, and 4th stages. Cleaning and post-disaster transformation methods were applied in the Abdullahpaşa Neighborhood (Table 2). The project was carried out by MEUCC and implemented by TOKİ. The project start year is 2020 and the end year is 2022. Within the scope of the project, 2164 independent units and 156 workplaces were demolished, and the destroyed buildings were four-story, five-story, and six-story reinforced concrete structures. The total parcel area of the application is 32.99 hectares. Instead of the independent units and workplaces in the risky area, 2287 independent units and 287 workplaces were built, the structures were designed as five and six floors of reinforced concrete, and the flats were designed as 2+1 and 3+1. In addition, 63 flat owners in the Sivrice Gölbaşı Neighborhood were placed in these buildings (Table 1). In the Abdullahpaşa Neighborhood application, it is seen that the consensus was low in the first phase, and the consensus disappeared towards the end of the application, however, the participation of the public was very low in the first stage and there was no participation at the end of the application (Table 3).

An area of 11.62 hectares in the Mustafapaşa Neighborhood had been declared a risky area within the scope of Law No. 6306 by the Presidential Decree in 2020. After the earthquake with a magnitude of 6.8  $M_w$ , the project application area was declared as a risky area. The post-earthquake transformation project was carried out in stages and these stages were implemented as 1st, 2nd, 3rd, and 4th stages. Cleaning and post-disaster transformation methods were applied in the Mustafapaşa Neighborhood (Table 2). The urban transformation project was carried out by MEUCC and implemented by AFAD and TOKİ. The project start year is 2020 and the end year is 2022. 1635 independent units and 409 workplaces in the risky area were demolished, and the destroyed structures were four-, five-, and six-story reinforced concrete structures. The total parcel area of the application is 11.62 hectares. The number of independent units built in the risky area is 1829, the buildings are designed as five and six floors of reinforced concrete, flats are 2+1, 3+1 and flat square meters are 90 and 125  $m^2$  (Table 1). In the Mustafapaşa Neighborhood application, it is seen that the consensus was low in the first phase, and the consensus disappeared towards the end of the application, however, the public participation was very low in the first stage and there was no participation at the end of the application (Table 3).

An area of 6.02 hectares in the Rüstempaşa Neighborhood had been declared a risky area within the scope of Law No. 6306 by the Presidential Decree in 2020. After the earthquake with a magnitude of 6.8  $M_w$ , the project application area was declared as a risky area. The post-earthquake transformation project was carried out in stages and these stages were implemented as the 1st and 2nd stages. Cleaning and post-disaster transformation methods were applied in the Rüstempaşa Neighborhood (Table 2). The urban transformation project was carried out by MEUCC and implemented by AFAD and TOKİ. The project start year is 2020 and the end year is 2022. 793 independent units and 293 workplaces in the risky area were demolished, and the destroyed structures were four-, five-, lower, and seven-story reinforced concrete structures. The total parcel area of the application is 6.02 hectares. Instead of the independent units and workplaces in the risky area, 614 independent units and 195 workplaces were



built, the structures were designed as five and six floors of reinforced concrete, and the flats were designed as 2+1, 3+1 (Table 1). In the Rüstempaşa Neighborhood application, it is seen that the consensus was low in the first phase, and the consensus disappeared towards the end of the application, however, public participation was very low in the first stage and there was no participation at the end of the application (Table 3).

The Sürsürü Neighborhood urban transformation project had been implemented in Stage 1 and Stage 2. While the 1.20-hectare area of the 1st Stage was declared a risky area within the scope of Law No. 6306 in 2020, the 2nd Stage 17.72-hectare area was declared a "risky area" within the scope of Law No. 6306. Sürsürü Neighborhood 1st Stage urban transformation project was carried out by MEUCC and implemented by TOKİ. Cleaning and post-disaster transformation methods were applied in the Sürsürü Neighborhood (Table 2). The project start year is 2020 and the end year is 2022. 191 independent units and 2 workplaces in the risky area were demolished, and the destroyed structures were four, five, and six-story reinforced concrete structures. Instead of the independent units and workplaces in the risky area, 179 independent units were built, the buildings were made of reinforced concrete with five floors and the flats were designed as 3+1. The Sürsürü Neighborhood 2nd Stage urban transformation project was carried out by MUECC and implemented by TOKİ. The project start year is 2013 and the end year is 2022. 434 independent units and 25 workplaces in the risky area were demolished, and the destroyed structures were four-story, five-story, and six-story reinforced concrete structures. Instead of the independent units and workplaces in the risky area, 802 independent units and 40 workplaces were built, the buildings were made of reinforced concrete with four and five floors, and the flats were designed as 1+1, 2+1, and 3+1 (Table 1). In the Sürsürü Neighborhood application, it is seen that the consensus was low in the first phase, and the consensus disappeared towards the end of the application, however, the public participation was very low in the first phase and there was no participation in the end of the application (Table 3).

The 26.96 hectares area in the Kızılay Neighborhood had been declared an urban transformation and development project area in 2015 with the Municipality Law No 5393 and the Decision of the Council of Ministers. 7.05 hectares of the 26.96 hectares area was determined as a reserve building area by Law No. 6306. The urban transformation project, which started in 2015, was implemented by Elazığ Municipality. There are 978 independent units in the urban transformation and development project area of 26.96 hectares. The buildings are one, two, and three-story adobe, masonry, and reinforced concrete structures. The application area is a reserve structure area of 7.05 hectares (Table 1). In the Kızılay Neighborhood application, it is seen that the consensus was low in the first phase, and the consensus disappeared towards the end of the application, however, public participation was very low in the first phase and there was no participation at the end of the application (Table 3). Redevelopment, renewal, and cleaning methods have been applied in the Kızılay Neighborhood (Table 2).

The Güneş Site, situated in the center, was designated as an urban renewal area under Law No. 6306 by Presidential Decree in 2020. This decision was made due to the extensive damage and collapse of the structures within the site following a 6.8 Mw magnitude earthquake. The application area of the post-earthquake transformation project was made on 0.38 hectares and one parcel. Block A on the site was destroyed during the earthquake, and blocks B and C were heavily damaged. The number of independent units in the site is 72, the flats are 165 m<sup>2</sup> and the building type is reinforced concrete. The buildings to be constructed were designed and implemented as 72 independent units, flats of 3+1 and 100 m<sup>2</sup>. The project was carried out by MEUCC and the implementation phase was carried out by TOKİ (Table 1). Cleaning and post-disaster transformation methods were applied at the Güneş Site (Table 2). It is seen that there is a lot of agreement in the first and second phases of the implementation, but the consensus disappears towards the end of the implementation, however, public participation is very low in the first phase and there is no participation at the end of the implementation (Table 3).

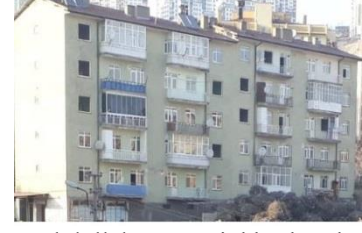
An area of 35.47 hectares in the Gölbaşı Neighborhood of Sivrice Country had been declared a risky area within the scope of Law No. 6306 by the Presidential Decree in 2020. After the earthquake with a magnitude of 6.8 Mw, the project application area was declared as a risky area. The post-earthquake transformation project was implemented as the 1st Stage. The urban transformation project was carried out by MEUCC and implemented by TOKİ. The project start year is 2020 and the end year is 2022. 377 independent units and 98 workplaces in the risky area were demolished, and the destroyed structures were one or two-story adobe and reinforced concrete structures. Instead of the independent units and workplaces in the risky area, 305 independent units and 83 workplaces were built, the structures were designed with reinforced concrete, one and two floors, and the flats were designed as 2+1. In addition, 63 beneficiaries in the risky area were placed in residences in the Abdullahpaşa Neighborhood (Table 1). Cleaning and post-disaster transformation methods were applied in the Gölbaşı Neighborhood of Sivrice Country (Table 2). It is seen that the consensus was moderate in the first and second phases of the implementation, and the consensus was low towards the end of the implementation. However, public participation was very low in the first phase and there was no participation at the end of the implementation (Table 3).



Karşıyaka Neighborhood



Cumhuriyet Neighborhood



Abdullahpaşa Neighborhood



Mustafapaşa Neighborhood



Rüstempaşa Neighborhood



Sürsürü Neighborhood



Kızılay (Kesrik) Neighborhood



Güneş Site



Sivrice-Gölbaşı Neighborhood

**Figure 2.** General view of some buildings in risky areas before urban transformation [14, 38, 39]



Karşıyaka Neighborhood



Cumhuriyet Neighborhood



Abdullahpaşa Neighborhood



Mustafapaşa Neighborhood



Rüstempaşa Neighborhood



Sürsürü Neighborhood



Kızılay (Kesrik) Neighborhood



Güneş Site



Sivrice-Gölbaşı Neighborhood

**Figure 3.** General views of buildings after urban transformation [14, 38, 39]

**Table 1.** Elazig urban transformation project information [14, 38, 39]

Urban Transformation Application Information	Karşıyaka Neighborhood	Cumhuriyet Neighborhood	Abdullahpaşa Neighborhood	Mustafapaşa Neighborhood	Rüstempaşa Neighborhood	Sürsürü Neighborhood	Kızılay Neighborhood	Güneş Site	Sivrice Country Gölbaşı Neighborhood
Project Start Date	2014	2014	2020	2020	2020	2013	2015	2020	2020
Project Completion Date	2020	2020	2022	2022	2022	2022	2022	2021	2022
UT Project Area (ha)	50.30	18.84	32.99	11.62	6.02	18.92	26.96	0.38	35.47
Application Area (ha)	6	2.84	32.99	11.62	6.02	18.92	7.05	0.38	35.47
Number of Independent Units Destroyed	330	138	2320	2044	1086	193	356	72	424
The Type of Independent that Destroyed	RCB	RCB /MB	RCB	RCB	RCB	RCB	RCB /MB	RCB	RCB /AH
Number of Independent Units Made	468	277	2574	1829	809	179	369	72	388
Type of Independent Made	RCB	RCB	RCB	RCB	RCB	RCB	RCB	RCB	RCB
Managing Institution	EM	EM	MEUCC	MEUCC	MEUCC	MEUCC	EM	MEUCC	MEUCC
Producer Institution	TOKI	TOKI	TOKI	TOKI / AFAD	TOKI / AFAD	TOKI	EM	TOKI	TOKI

AFAD: Disaster and Emergency Management Presidency AH: Adobe House EM: Elazig Municipality  
MEUCC: Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change MB: Masonry Building  
RCB: Reinforced Concrete Building TOKI: Housing Development Administration UT: Urban Transformation

**Table 2.** Elazig urban transformation projects implementation methods [39]

Project Information		Renewal	Rehabilitation	Protection	Reanimation	Redevelopment	Regulation	Cleaning	Refreshing	Integration	Gentrification	Development by Filling Gaps	Post-Disaster Transformation*
Elazig Center	Karşıyaka Neighborhood ***	✓				✓		✓					
	Cumhuriyet Neighborhood ***					✓							
	Abdullahpaşa Neighborhood ***							✓					✓
	Mustafapaşa Neighborhood ***							✓					✓
	Rüstempaşa Neighborhood ***							✓					✓
	Sürsürü Neighborhood ***							✓					✓
	Kızılay Neighborhood ***	✓				✓		✓					✓
	Güneş Site**							✓					✓
Sivrice Country	Gölbaşı Neighborhood***						✓					✓	

\* Post-Disaster Transformation Method is a method that emerged as a result of urban transformation projects implemented in areas where risky buildings are located after the earthquake [39]  
\*\*Individual Urban Transformation  
\*\*\* Public Urban Transformation

**Table 3.** Elazig urban transformation projects implementation techniques [39]

Project Information		Compromise			Public Participation		
		First Phase	Second Phase	Third Phase	First Phase	Second Phase	Third Phase
Elazig Center	Karşıyaka Neighborhood ***	+++	++	++	✓ ✓	✓	✓
	Cumhuriyet Neighborhood ***	+++	++	++	✓ ✓	✓	✓
	Abdullahpaşa Neighborhood ***	++	+	+	✓ ✓	✓	✓
	Mustafapaşa Neighborhood ***	++	+	+	✓ ✓	✓	✓
	Rüstempaşa Neighborhood ***	++	+	+	✓ ✓	✓	✓
	Sürsürü Neighborhood ***	++	++	++	✓ ✓	✓	✓
	Kızılay Neighborhood ***	++	++	+	✓ ✓	✓	✓
	Güneş Site**	++++	++++	+	✓ ✓	✓	✓
Sivrice Country	Gölbaşı Neighborhood***	+++	+++	++	✓ ✓	✓	✓
No Agreement: + Little Agreement: ++ Moderate Agreement: +++ Lots of Compromise: ++++							
No Participation: ✓ Low Participation: ✓ ✓ Medium Participation: ✓ ✓ ✓ High Participation: ✓ ✓ ✓ ✓							

#### 4. Conclusion and Recommendations

The earthquake that occurred in Elazig in 2020 seriously brought urban transformation projects to the agenda and accelerated the projects. In addition, it was seen that the province was not ready for the earthquake and its consequences, and this situation also affected the choice of methods and techniques in urban transformation applications. In this context, although there are mistakes in the method and technique selection of urban transformation works implemented throughout Elazig, the identification of damaged structures and the continuation of the transformations by including these structures in urban transformation and the completion of the applications have minimized the effects of the 6 February 2023 Kahramanmaraş Pazarcık and Elbistan earthquakes throughout the province.

The improvement and change (Figure 3) experienced as a result of urban transformation practices of pre-earthquake buildings in risky areas (Figure 2) had a positive impact on the urban identity. Some of the situations resulting from the reflections of these effects are summarized below;

- The Karşıyaka Neighborhood was declared as an urban transformation and development area within the scope of Article 73 of the Municipality Law. However, the methods applied were in the form of redevelopment, renewal, and cleaning methods due to the impact of the earthquake.
- The Cumhuriyet Neighborhood has been declared as a disaster risk area by the Municipality Law. An area of 18.84 hectares was declared a risky area and an area of 2.85 hectares was declared a reserve building area. The method is redevelopment. However urban transformation was not implemented here. New buildings were built only in the reserve building area.
- The Abdullahpaşa Neighborhood has been declared a risky area within the scope of Law No. 6306. The methods used were cleaning and post-disaster transformation.
- The Mustafapaşa Neighborhood has been declared a risky area within the scope of Law No. 6306. The methods used were cleaning and post-disaster transformation.
- The Rüstempaşa Neighborhood has been declared a risky area within the scope of Law No. 6306. The methods used were cleaning and post-disaster transformation.
- The Sürsürü Neighborhood was declared a "Risky Area" by the Decision of the Council of Ministers in 2013, it was declared a "Risky Area" again within the scope of Law No. 6306 after the earthquake in 2020. Here, the use of cleaning and post-disaster transformation methods was preferred.
- The Kızılay Neighborhood was declared as an urban transformation and development area within the scope of Article 73 of the Municipality Law in 2015. Redevelopment, renewal, and cleaning methods have been used in these areas.
- The Güneş Site was declared a risky building in a risky area by the Presidential Decree within the scope of Law No. 6306. The methods used were cleaning and post-disaster transformation.
- The Gölbaşı Neighborhood of Sivrice Country has been declared a risky area within the scope of Law No. 6306. In the Sivrice Country, the cleaning and post-disaster transformation methods preferred in Elazig city center were used.

As explained above; these are important parameters in the success of the methods and technical applications to be chosen in the urban transformation process and in reaching the desired goal. In choosing these parameters,

choices should be made by examining each city individually. Because the places within the scope of transformation have their cultural characteristics, economic conditions, and natural disaster risk situations. For this reason, the methods and techniques to be chosen should be chosen and implemented by considering these features. In urban transformation projects, general principles can be determined at the upper scale, but as sub-applications progress, it will be useful to determine methods and techniques specific to each region. In addition, urban transformation practices around the world are carried out in cooperation with the public, private sector, and public. When we look specifically at Elazığ, it can be seen that public participation in urban transformation projects is at the initial stage, which is the stage of being declared a risky area. In this context, while urban transformation practices should be continued with the participation of the public, starting from the first phase until the last phase of the project, unfortunately, this method could not be implemented due to the urgency of housing construction within the scope of post-earthquake urban transformation.

As can be seen in Table 1, Elazığ Municipality has completed the urban transformation applications in three risky areas, and MEUCC has completed the applications in six risky areas. The producer organization of seven of these applications is TOKİ, one is TOKİ and AFAD Partnership and one is Elazığ Municipality.

As can be seen in Table 2, the "Renewal and Cleaning" method was applied in the Karşıyaka Neighborhood and the Kızılay Neighborhood, and the "Cleaning" method was applied in other risky areas. In terms of the urban transformation application method, only the Güneş Site was completed based on the individual urban transformation method. Additionally, as can be seen from the table, the post-disaster transformation method has emerged as a result of urban transformation projects implemented in areas where risky buildings are located after the earthquake.

As can be seen from Table 3, only in the Güneş Site, a general specialization was achieved among the flat owners in the early stages of the implementation process, but serious problems were experienced in compromise due to the physical characteristics of the flats during the project completion phase. The draw has caused some problems between the flat owners and the developer regarding issues such as the square meter of the flats and the orientation and location of the flats.

After February 6, 2023, Kahramanmaraş Pazarcık and Elbistan earthquakes, the completion of the transformation works of damaged buildings throughout the province, especially those with moderate and severe damage, will contribute to urbanization that is more resistant to earthquakes that may occur in the future. In addition, pre-disaster, disaster, and post-disaster risk reports prepared through microzoning studies throughout the province will also be useful.

In conclusion, more qualified urban transformation results will be achieved by reducing the problems arising in public transformation projects and by including the reconciliation method in the recycling process, taking into account the spatial, social, economic, bioharmological, ecological, and environmental dimensions of the comprehensive transformation.

## Note

This study is derived from the Doctoral Thesis titled "Bioharmological Investigation of the Engineering Properties of Urban Transformation Buildings Constructed in Risky Areas: Elazığ City Center Sample", conducted by B.E under the academic supervision of C.E.E. Additionally, it was supported within the scope of project number FÜBAP TEKF.23.55.

## References

- [1] Aydurmuş B, Kentsel dönüşüm alanlarında uygunluk analizi: Gümüşhane örneği. Master Thesis, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, 2017.
- [2] Ekinci CE. Bordo Kitap: Mimar ve Mühendisin İnşaat El Kitabı (11. Baskı), Ankara, Türkiye: Data Yayınları, 2023.
- [3] Ekinci CE. Yapı. (2. Baskı), Ankara, Türkiye: Data Yayınları, 2021.
- [4] Gür M, Kentsel dönüşüm uygulamasında yaşam kalitesi araştırması ve kavramsal bir model önerisi: Bursa Doğanbey örneği. PhD. Thesis, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 2014.
- [5] Damgacı T. Kentsel dönüşüm projeleri ve kamu yararı: meram belediyesi kentsel dönüşüm projeleri. Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi 2020; 55(4):2478-2498.
- [6] Sönmez M. Kentsel Dönüşüm Hukuku. İstanbul, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2019.
- [7] Doğan M, Afet riski altındaki alanların dönüştürülmesi: Yıldırım Belediyesi örneği. Dönem Projesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2018.
- [8] Ekinci CE, Elyiğit B. Kentsel Dönüşüm. Ankara, Türkiye: Data Yayınları, 2022.
- [9] Dalla Longa R. Urban models, in: urban models and public-private partnership. Springer-Verlag, 2011.

- [10] Kitchin R. The real-time city? big data and smart urbanism. *GeoJournal* 2014; 79(1):1-14.
- [11] Lehmann S. Introduction: The Complex Process of City Regeneration: A Manifesto for Transforming UK Cities in the Age of Climate Change. *Urban Regeneration: Palgrave Macmillan, Cham, 2019.*
- [12] Avcıoğlu S. Tarihi çevrelerde kentsel koruma ve kentsel yenileme eğilimleri: yasal ve yönetsel çerçeve. *Kent Araştırmaları Dergisi* 2016; 20(7):698-719.
- [13] Çardak SF, Kentsel dönüşüm bağlamında TOKİ konutlarının incelenmesi: Yüreğir Sinanpaşa kentsel dönüşüm projesi ve Aksantaş TOKİ örneği. Master Thesis, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2011.
- [14] URL-1, <https://www.csb.gov.tr/>. Erişim Tarihi: 04.01.2023.
- [15] Doğanay E, Türkiye’de kentsel dönüşüm politikaları (2002-2014 Dönemi). Master Thesis, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2016.
- [16] Türkmen Ö, Kentsel dönüşüm uygulamalarında sürdürülebilirlik ve örnekler üzerinden analizi/ Gülsuyu-Gülensu örneği. Master Thesis, Yakın Doğu Üniversitesi, Lefkoşa, 2018.
- [17] Wheeler SM, Beatley T. *The Sustainable Urban Development Reader. Third Edition.* London, England: Urban Reader Series, Routledge, 2014.
- [18] İlkme M. Kentsel Dönüşüm ve Bursa Raporu. TMMOB Şehir Plancıları Odası Bursa Şubesi; Bursa; 2008. ss:41.
- [19] Yaman M. Türkiye’de kentsel dönüşüm uygulamaları kapsamında Kütahya kenti Osmangazi kentsel dönüşüm uygulamasına bir bakış. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi Kütahya Özel Sayısı* 2014.
- [20] Çatalbaş F, Kentsel Dönüşüm Projelerinin Mekansal ve Sosyo-Ekonomik Etkileri: Diyarbakır İli Suriçi Bölgesi Örneği. Master Thesis, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2011.
- [21] Keleş R. *Kentbilim Terimleri Sözlüğü.* Ankara, Türkiye: İmge Kitabevi Yayınları, 1998.
- [22] Kovancı P, Urban Regeneration Issues and Policies as Complementary and Multi-Aspect Planning Tools, Master Thesis (Unpublished), Middle East Technical University, Ankara, 1996.
- [23] İnam Ş, Salalı V. Türkiye’de kentsel dönüşüm çalışmalarının hukuki boyutu ve uygulamada karşılaşılan yasal sorunlar. *Ankara Barosu Dergisi* 2021; 1(75-110).
- [24] Polat S, Dostoğlu N. Kentsel dönüşüm kavramı üzerine: Bursa’da Kükürtlü ve Mudanya örnekleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2007; 12(1)61-76.
- [25] Kaş M, Konut sorununun çözümünde kentsel dönüşüme kullanıcı katılımının sağlanması üzerine bir yöntem araştırması: Konya örneği. PhD. Thesis, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2014.
- [26] Göksu AF. Yenileme projelerinde uzlaşma yönetimi ve stratejik planlamanın önemi. *Mimarlık Dergisi* 2010; 352.
- [27] Göksu AF, Uzlaşma yönetiminin altı temel İlkesi. [https://www.kentselstrateji.com/wp-content/uploads/E-01\\_UzlasmaYonetimi6B.pdf](https://www.kentselstrateji.com/wp-content/uploads/E-01_UzlasmaYonetimi6B.pdf), 2011.
- [28] Seydioğulları HS, Yeni yasal düzenlemelerle kentsel dönüşüm. *Planlama Dergisi* 2016; (26)51-64.
- [29] Abelson J, Forest P-G, Eyles J, Smith P, Martin E, Gauvin FP. *Deliberations about Deliberation: Issues in the Design and Evaluation of Public Consultation Processes.* McMaster University Centre for Health Economics and Policy Analysis Research Working Paper; 01-04, June 2001.
- [30] Chang S, Yoshida T, Castro Lacouture D, Yamagata Y. Block-level building transformation strategies for energy efficiency, thermal comfort, and visibility using bayesian multilevel modeling. *Journal of Architectural Engineering* 2021; 27(3).
- [31] Sabeeh Lafta F, Antón García D, Venus Suleiman A, Salah Lafta Z, Khalid Safaa H. Factors influencing the transformation of Iraqi Holy Cities: The case of Al-Najaf. *Engineering and Environmental Sciences* 2021; 30(2)365-375.
- [32] Zhou TC, He XT, Zang TG, Yang XQ, Ikebe K. The neglected voices within urban village regeneration as a historic urban landscape: a case study of Nantou Village in Shenzhen. *Current Urban Studies* 2022; (10)763-786.
- [33] Hong Y. Resident participation in urban renewal: focused on Sewoon Renewal Promotion Project and Kwun Tong Town Centre Project. *Frontiers of Architectural Research* 2018; 7(2)197-210.
- [34] Moloney S, Ralph H. Low carbon urban transitioning: from local experimentation to urban transformation? *Sustainability* 2015; (7)2437-2453.
- [35] Ekinci CE. Bina sertifikalandırma yöntemleri ve önerilen yeni bir yöntem: biyoharmolojik uygunluk değerlendirme. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2024; 39(2)717-728.
- [36] Fırat Üniversitesi Yapı ve Beton Uygulama ve Araştırma Merkezi, 24 Ocak 2020 6,8Mw Sivrice Depremi, Elazig Bölgesi Yapısal Hasarlar İnceleme ve Değerlendirme Raporu, Rapor No: 2020/D001.
- [37] Elyiğit, B, Ekinci, CE. Betonarme yapılarda yapısal ve yapısal olmayan hasarlar ve hasar tespiti üzerine bir araştırma. *Engineering Sciences* 2023; 18(2)19-42.
- [38] URL-2, <https://www.Elazig.bel.tr/>. Erişim Tarihi: 10.01.2023.
- [39] Elyiğit B. Kentsel dönüşüm uygulamaları ve sonuçları: Elazig örnekleme. PhD. Seminar, Fırat Üniversitesi, Elazig, 2022.

## Çift Doğrusal CNN Kullanarak Çelik Yüzey Kusurlarının Sınıflandırılması

Emre GÜÇLÜ<sup>1\*</sup>, İlhan AYDIN<sup>2</sup>, Erhan AKIN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
<sup>1</sup> eguclu@firat.edu.tr, <sup>2</sup> iaydin@firat.edu.tr, <sup>3</sup> eakin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 07/07/2023;

Kabul/Accepted: 13/12/2023)

**Öz:** Çelik, endüstride oldukça fazla kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Çelik üreticileri arasındaki rekabetin artmasıyla birlikte çelik ürünlerin yüzey kalitesi daha önemli bir hale gelmiştir. Çelik yüzeylerde oluşabilecek kusurlar tespit edilemediğinde daha büyük sorunlara neden olabilmektedir. Günümüzde, çelik yüzey kusurlarını algılama sistemleri, geleneksel kusur tespit yöntemlerinin yerini almıştır. Yüzey kusurları, sağlam çelik görünümünden farklı olarak anormal görünüme sahiptir. Bu kusurların tespiti için derin öğrenme tabanlı yöntemlerin kullanılması, pahalı yöntemlere göre birçok avantaja sahiptir. Bu nedenle, Endüstri 4.0 ile birlikte çelik ürünler üzerinde oluşabilecek kusurların tespiti için bilgisayarlı görmeye dayalı yöntemler daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, çelik yüzeylerde oluşabilecek kusurların sınıflandırılması için çift doğrusal evrişim sinir ağı (Bilinear-CNN) kullanılmıştır. Eğitim için kullanılan veri kümesinde kusurlu ve kusursuz veriler birbirine oldukça benzerdir. Çift doğrusal havuzlama yöntemi, daha yüksek dereceli ve uzamsal sırasız bilgileri çıkarabilme yeteneğine sahiptir. Böylece benzer veri kümelerinde yüksek performans elde ettiği gösterilmiştir. Önerilen yöntemin performansı farklı ağlar için değerlendirilmiştir. %98,26 doğruluk oranıyla en yüksek sonucu Bilinear Xception modeli elde etmiştir. Sonuçlar, çift doğrusal evrişimli sinir ağının benzer görüntülerden oluşan veri kümelerini sınıflandırmada yüksek performans elde ettiğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Çelik yüzey kusurları, Kusur tespiti, Çift doğrusal CNN

### Classification of Steel Surface Defects Using Bilinear CNN

**Abstract:** Steel is one of the most widely used building materials in the industry. With the increasing competition among steel manufacturers, the surface quality of steel products has become more important. Defects that may occur on steel surfaces can cause bigger problems when they are not detected. Today, steel surface defect detection systems have replaced traditional defect detection methods. Surface imperfections have an anomalous appearance as opposed to the appearance of solid steel. Using deep learning-based methods to detect these defects has many advantages over expensive methods. Therefore, with Industry 4.0, computer vision-based methods are more widely used for the detection of defects that may occur on steel products. In this study, bilinear convolutional neural network (Bilinear-CNN) is used to classify defects that may occur on steel surfaces. In the dataset used for training, defect and non-defect data are very similar to each other. The bilinear pooling method is capable of extracting higher order and spatially unordered information. Thus, it has been shown to achieve high performance in similar datasets. The performance of the proposed method has been evaluated for different networks. Bilinear Xception model obtained the highest result with an accuracy rate of 98.26%. The results show that the bilinear convolutional neural network achieves high performance in classifying datasets consisting of similar images.

**Key words:** Steel surface defects, Defect detection, Bilinear CNN

### 1. Giriş

Çelik ürünlerde oluşabilecek kusurlar, üretim sürecinde ortaya çıkabilecek en önemli sorunlardan biridir. Çelik ürünler üretildikten sonra üretimi bitmiş ürünlerin kalite değerlendirmesi üzerinde çalışılması gereken zor bir işlemdir. Çelik üretimi sırasında kullanılan yöntemlerden dolayı nihai ürünün kalitesi bozulabilmektedir. Özellikle eritme ve biçimlendirme aşamalarında ürün üzerinde kusurlar meydana gelebilmektedir. Ürün yüzeyinde meydana gelebilecek çatlak, göçük, çizik kusurlar ürünün kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Kusurlar sadece çeliğin görünümünü etkilemez, aynı zamanda çeliğin dayanımına da zarar verir. İmalatçılar kusurlara zamanında müdahale edemezlerse çelikten üretilen ürünün kalitesi de olumsuz etkilenecektir. Bu nedenle, çelik yüzey kusurlarının tespiti, çelik endüstrisi için temel kalite kontrol görevlerinden biridir. Endüstriyel çelik üretiminde, nihai ürünün kusursuz olmasını sağlamak için ürün yüzeylerinin incelenerek kusur olup olmadığı belirlenmelidir. Genel olarak, üretilen ürünlerdeki farklı kusurlar arasında belirli benzerliklerin olması ve aynı kusurların

\* Sorumlu yazar: [eguclu@firat.edu.tr](mailto:eguclu@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-4566-7517, <sup>2</sup> 0000-0001-6880-4935, <sup>3</sup> 0000-0001-6476-9255

görünümünde farklılıklar olması gibi nedenlerden dolayı kusur tespitinin zor bir işlem olduğunu göstermektedir. Çelik yüzeylerde birbirine benzeyen önemli sayıda kusur bilinmektedir [1].

Genellikle, çelik ürünlerin yüzeyi uzman kişiler tarafından manuel olarak incelenir. İnsan müfettişler ürünü inceleyip kusurları belirler ve inceleme sonuçları kusur oluşumunu azaltmak için geri bildirim olarak kullanılır. Bu yöntem, denetim yapan kişinin deneyimine bağlıdır, özeldir ve belirli bir aşamaya kadar güvenilirdir. Ancak manuel denetim sıkıcı ve yorucu bir iştir [2]. Bu nedenle üretilen tüm ürünler insanlar tarafından denetlenemez. Manuel denetimin bu dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda denetimin bilgisayar görmesi kullanılarak otomatik hale getirilmesi çelik denetimi için güvenilir, düşük maliyetli, nesnel ve hızlı bir kontrol sistemi sağlayabilir. Bu nedenle, endüstride kusur tespiti için yapılan çalışmalar artarak devam etmektedir. Özellikle bilgisayarlı görme ve derin öğrenme kullanılarak geliştirilen yöntemler, elde edilen yüksek doğruluk oranlarıyla gelecek vaat etmektedir. Bu yöntemler, eğitim için yeterli veri kümesi sağlandığında kusurları tespit etmeyi sağlar.

Son yıllarda, bilgisayarlı görmeye dayalı kusur inceleme teknolojisi, geleneksel yöntemlerin dezavantajlarının üstesinden gelebilmek için temassız ve tam otomatik olarak uygulanabildiği için araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür [3-4]. Çelik yüzeylerindeki kusurların tespiti için kullanılan mevcut yöntemler, görüntülerin özelliklerini çıkararak kusur tiplerinin belirlemek için sınıflandırma yapar. Literatür incelendiğinde bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Önce görüntü özellikleri Gabor filtreleri [5], dalgacık filtreleri [6], HOG [7] gibi teknikler kullanılarak çıkartılır, ardından SVM benzeri sınıflandırma yöntemleriyle sınıflandırılır [8].

Özellikle derin öğrenmenin gelişmesiyle birlikte Evrişimli Sinir Ağları (CNN) bu alanda kullanılmıştır. Çelik yüzeylerdeki hataların tespiti için görüntü işleme ve derin öğrenme tabanlı analiz algoritmaları oldukça fazla kullanılmaktadır. Makine öğrenmesinin bir alt dalı olan derin öğrenme, çok katmanlı bir öğrenme sürecini kullanarak karmaşık sınıflandırma problemlerini çözebilir. Evrişimli sinir ağları görüntü tanıma görevleri için özel olarak tasarlanmış yöntemlerdir. Evrişimli sinir ağı görüntüdeki tüm bilgileri tutarak nesnelere doğru bir şekilde sınıflandırılmasını sağlayabilir. [9]'da, çelik yüzey kusurlarının tespiti için gömülü sistem tasarlanarak YOLOv5 ve YOLOv7 algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. [10]'da, haddelenmiş çelik yüzeylerdeki kusurları tespit etmek ve sınıflandırmak için ResNet50 sinir ağına dayalı sınıflandırıcı kullanılmıştır. [11]'de, çelik üzerindeki kusurları tanıma için evrişimli sinir ağı (CNN) tabanlı yarı denetimli bir öğrenme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde daha az veri kullanılması sağlanmıştır. [12]'de, Derin öğrenmeye tabanlı bir çelik kusur tespit sistemi önerilmiştir. Çalışmada, sınıflandırma yeteneğini artırmak için CNN kullanılarak her aşamada özellik haritaları oluşturulup birden fazla özelliği içerebilen tek özellikte birleştirilerek çok düzeyli füzyon ağı (MFN) önerilmiştir. [13]'te, derin öğrenme kullanılarak çelik kusurlarının tespiti yapılmıştır. Çalışmada, derin sinir ağı tabanlı bir teşhis modeli ve makine öğrenimi tabanlı sınıflandırma modeli uygulanmıştır. [14]'te, kusur tespiti için önerilen CNN ile omurga mimarisi olarak önceden eğitilmiş SqueezeNet'i benimseyerek gerçek zamanlı bir tespit yöntemi önerilmiştir. [15]'te, çelik yüzey hatası tanıma için CNN'ye dayalı yarı denetimli bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemde, sınırlı bir etiketli veri seti ile %17,53 oranında iyileştirme elde edilmiştir. [16]'da, geliştirilmiş YOLOv4 algoritmasına dayalı bir çelik şerit yüzey hatası algılama yöntemi önerilmiştir. Önerilen algoritma kullanılan veri kümesi için ortalama kesinlik değerlerini %3,87 oranında iyileştirerek %85,41'e ulaşmıştır. [17]'de, çelik malzemelerin yüzeylerindeki kusurları tespit etmek için CNN tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada önerilen mimari, çelik kusurlarını sınıflandırmada yüzde 95,21 oranında doğruluk oranı elde etmiştir.

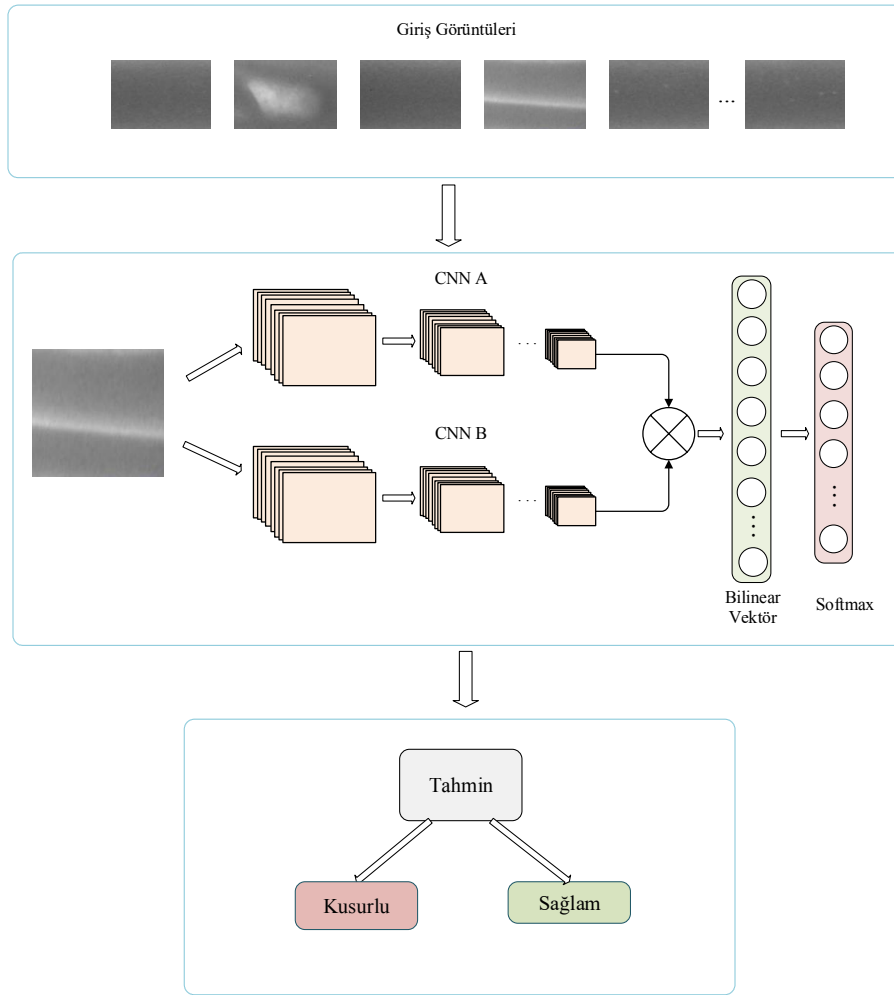
Literatürde kullanılan yöntemler iyi sonuçlar elde etse de çelik yüzeylerin sahip olduğu özellikler, kusurların tespiti için bazı zorluklar oluşturmaktadır. Bu zorluklardan biri çelik üzerinde meydana gelen kusurların bazıları geniş alanı kaplarken bazılarının oldukça küçük olmasıdır. Yüzey üzerindeki küçük kusurların tespit edilmesi genellikle zordur. Küçük kusurların bulunduğu veri kümelerinde daha doğru bir sınıflandırma yapabilmek için modelin tespit yeteneği artırılmalıdır. Kusurlu ve kusursuz çelik görüntülerindeki benzerlikler nedeniyle çelik yüzeylerdeki kusur tanıma görevi, ince taneli bir sınıflandırma görevi olarak düşünülebilir. Çift doğrusal CNN modelleri, ince taneli sınıflandırma problemini çözmek için önerilmiştir. Çift doğrusal CNN'de görüntülerin açıklamasını elde etmek için iki adet CNN tabanlı özellik çıkarıcı kullanılır. Özellik çıkarıcıların çıktılarının görüntünün her konumunda dış çarpım olarak çoğaltılır ve konumlar arası havuzlanır. Dış çıktılar ürünü parça-özellik etkileşimlerini arasındaki ikili korelasyonları yakalar. Böylece model iyi bir performans elde edebilir. Kusur tespiti için çift doğrusal CNN kullanan çalışmalar, yüksek doğruluk oranları elde etmiştir. [18]'de yüzey kusurlarının sınıflandırılmasını gerçekleştirmek için çift doğrusal modele dayanan bir yöntem önerilmiştir. D-VGG16 tarafından çift doğrusal modelden elde edilen özellikler softmax fonksiyonuna aktarılıp Sınıf Aktivasyon Haritalaması (Grad-CAM) kullanılarak kusurlu bölgenin lokalizasyonu gerçekleştirilmiştir. [19]'da, görüntü tabanlı erimiş havuz deliği (MPK) kusurlarının tanınması için dikkat tabanlı çift doğrusal özellik çıkarma mekanizması geliştirilmiştir. [20]'de, dökümlerde tahribatsız kusur tespiti için mekansal dikkat mekanizması ve çift doğrusal havuzlamayı birleştirerek yeni bir yöntem önerilmiştir.



Bu çalışmanın amacı, sınıfları arasında benzerlikler olan veri kümeleri için ince taneli görsel tanıma uygulamaktır. Çelik görüntüsü üzerinde sadece noktasal hataların bulunması sınıflandırma görevini zorlaştırmaktadır. Kullanılan çift doğrusal modeller görsel nesnelere tanırken belirli detaylara odaklanarak ayrıntıların özelliklerini çıkarmaktadır. Çalışmada, sınıflandırma görevleri için sıklıkla kullanılan ağlar kullanılmıştır. Kullanılan MobileNetv2 ve Resnet50 gibi ağlar kusurlu görüntülerin sınıflandırılması için oldukça iyidir. Ancak noktasal hatalar gibi küçük ayrıntıları sınıflandıramayabilir. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, seçilen CNN modelleri önce tek kullanılarak eğitilmiş ardından çift doğrusal model yapısı kullanılarak eğitilmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak yöntemin performansı değerlendirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

Çalışmanın bu bölümünde, çelik yüzey görüntülerinden kusurları tespit etmek için çift doğrusal CNN tabanlı yöntemin aşamaları açıklanmıştır. Çift doğrusal CNN yapısında önceden eğitilmiş modeller kullanılmıştır. Buradaki amaç, eğitim maliyetlerini azaltmak ve sınıflandırma için uygun ağırlıkları seçmektir. Bu nedenle, eğitime ImageNet veri kümesi üzerinde eğitilmiş modeller ile başlanmıştır. Çift doğrusal CNN yapısında kullanılan modeller VGG16, Resnet50, Xception ve MobileNetv2'dir. Tüm adımları tamamladıktan sonra, çeliklerde kusur tespiti için en iyi performans gösteren modeli belirlemek için sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada kullanılan veri kümesi, Dingming Yang ve arkadaşlarının [21], gerçek zamanlı X-ray görüntüleme sistemi ile topladığı çelik boru görüntülerinden oluşmaktadır. Oluşturulan veri kümesi 600 sağlam ve 550 kusurlu görüntüden oluşmaktadır. Önerilen yöntemin mimarisi, Şekil 1'de gösterilmektedir.

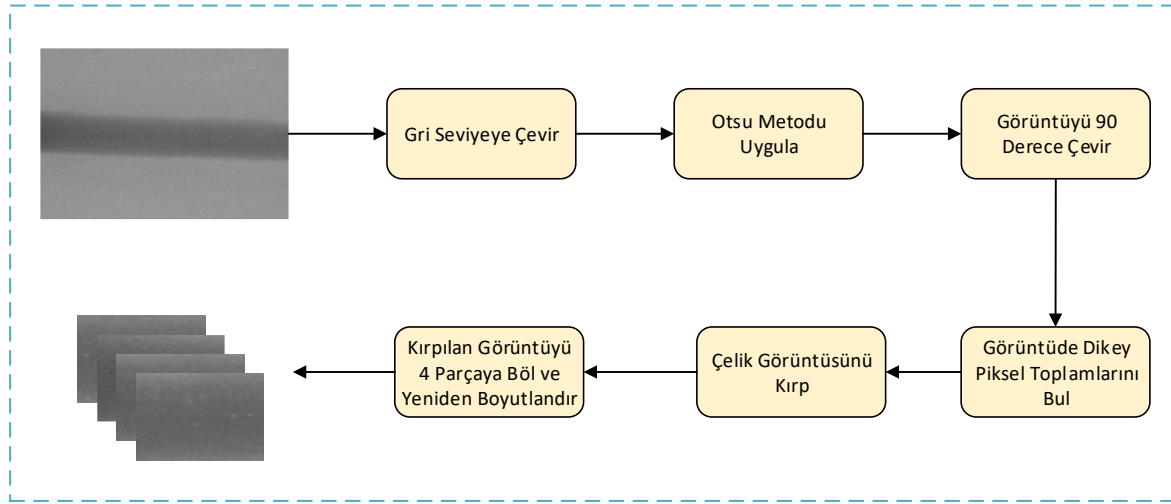


Şekil 1. Kusur tespiti için önerilen yöntem

## 2.1 Görüntü önileme

İlk aşamada elde edilen veri kümesindeki veri miktarı, eğitim süreci için yetersizdir. Orijinal görüntüden elde edilen çelik görüntüsünün tek parça halinde kullanılması eğitim kalitesini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu nedenle, iyi bir eğitim sürecini gerçekleştirmek için veri kümesinde bulunan görüntülerden çelik görüntüsü kırılarak elde edilen kırılmış çelik görüntüsü 4 eşit parçaya bölünmüştür. Ardından, modelin girişine uygun olması için 224x224x3 boyutlarında yeniden boyutlandırılmıştır. Böylece veri kümesindeki örnek sayısının fazla olması sağlanmıştır. Elde edilen veri kümesindeki görüntüler incelenerek sağlam ve kusurlu olmak üzere ayrılmıştır. Veri kümesinin oluşturulması için önerilen yöntem Şekil 2’de verilmiştir.

Alınan görüntü üzerinde çelik görüntüsünü kırabilmek için çeliğin sınırlarını belirlemek gerekmektedir. Bu nedenle giriş görüntüsüne eşikleme yapılmıştır. Görüntü eşikleme, görüntüyü siyah ve beyaz piksellerden oluşan ikili hale getirmek için kullanılır. Bu çalışmada, eşikleme işlemi için Otsu metodu kullanılmıştır [22].



Şekil 2. Veri kümesinin oluşturulması için önerilen yöntem

Giriş görüntüsü, 0 ile  $L - 1$  gri seviye aralığında  $I(x, y)$  olarak tanımlanırsa ve  $L$ , görüntüdeki farklı gri seviye sayısı kabul edilirse;  $i$  gri seviyeye sahip piksel sayısı  $n_i$  ve  $n$ ,  $M \times N$  boyutlu bir dizinin piksel sayısı olsun. Gri seviye  $i$ 'nin oluşma olasılığı Denklem 1'deki gibidir.

$$p_i = \frac{n_i}{n} \quad (1)$$

Giriş görüntüsü  $t$  eşiği ile iki sınıfa ayrılırsa, ilk sınıf  $[0, t]$  seviyelerine sahip piksellerden ve diğer sınıf  $[t+1, L-1]$  seviyelerine sahip piksellere sahip olur.  $P_0(t)$  ve  $P_1(t)$  kümülatif olasılıkları, aşağıdaki denklemlerde belirtildiği gibi hesaplanır.

$$P_0(t) = \sum_{i=0}^t p_i \quad (2)$$

$$P_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i = 1 - P_0(t) \quad (3)$$

İki sınıf için ortalama seviyeleri Denklem 4 ve Denklem 5'teki gibi hesaplanır.

$$u_0(t) = \sum_{i=0}^t i * \frac{p_i}{P_0(t)} \quad (4)$$

$$u_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} i * \frac{p_i}{P_1(t)} \quad (5)$$

Belirlenen bir t eşiği için sınıflar arası varyans Denklem 6'daki gibi hesaplanır.

$$\delta_b(t) = P_0(t)(u_0(t))^2 + P_1(t)(u_1(t))^2 \quad (6)$$

Otsu yönteminde uygun eşik değeri Denklem 7'deki gibi bulunur.

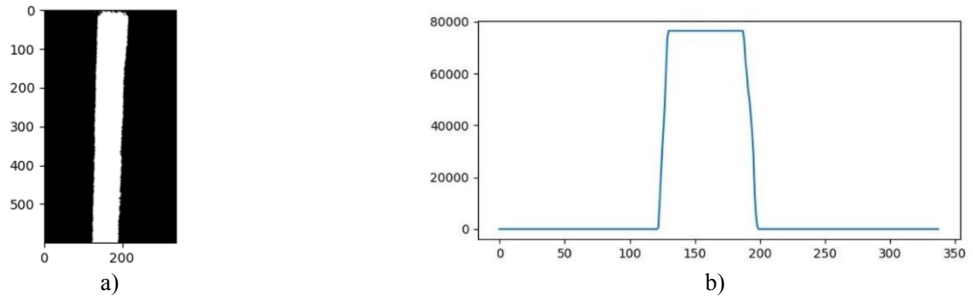
$$T = \underset{1 < t < L}{argmax} \delta_b(t) \quad (7)$$

Şekil 3.a'da, orijinal çelik görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.b'de Otsu yöntemi kullanılarak bir eşik oluşturulmuştur ve sonuç gösterilmiştir. Gri seviye görüntüde gri seviyesi eşikten daha düşük ise siyah ile daha büyük ise beyaz ile tanımlanmıştır.



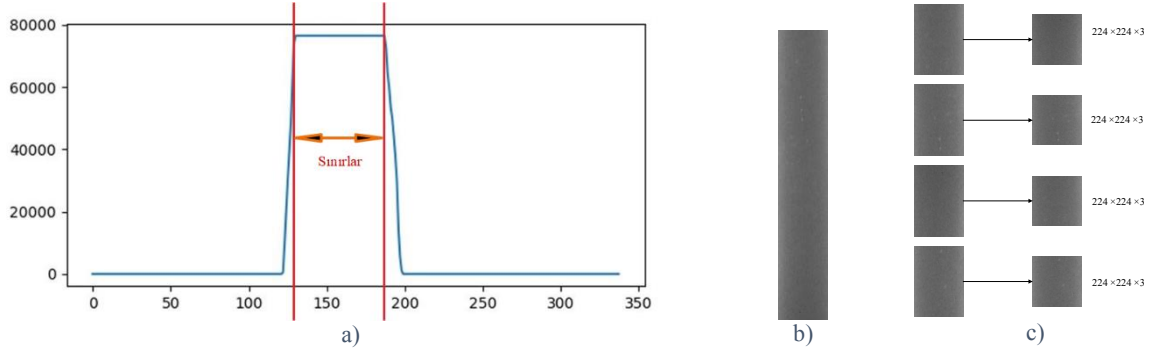
Şekil 3. Otsu eşikleme sonucu a) Orijinal görüntü b) Otsu metodu uygulandıktan sonra oluşan görüntü

Görüntüdeki çelik sınırlarını belirlemek için Şekil 3.b'deki görüntü 90° döndürülüp elde edilen görüntünün histogramı elde edilmiştir. Elde edilen histogramdan, görüntünün X eksenindeki en yüksek yoğunluğa sahip pikseller pik noktası oluşturmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, çeliğin olduğu pikseller histogramda pik noktası oluşturmıştır.

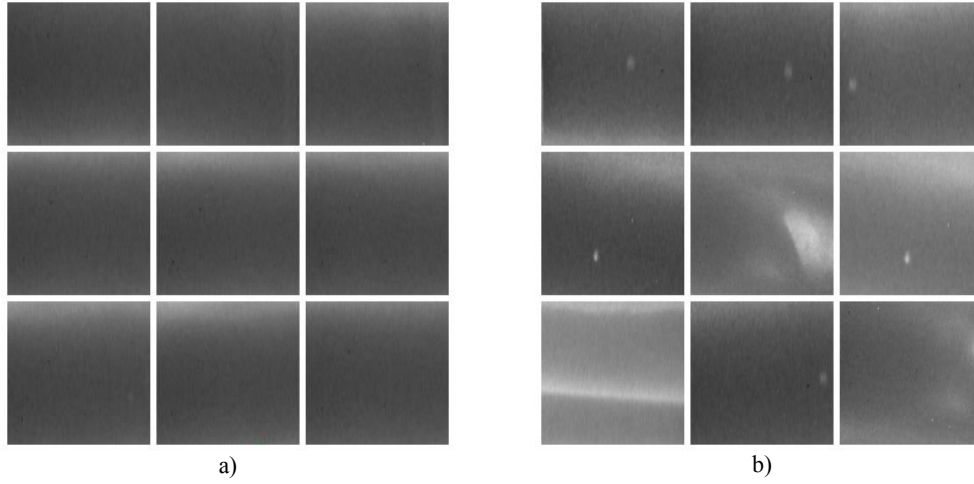


Şekil 4. Histogram çıktısı a) Giriş görüntüsü b) Beyaz piksellerin x eksenini boyunca oluşturduğu pik noktası

Şekil 5'te görüldüğü gibi orijinal görüntüden kırılarak elde edilen çelik görüntüsü, 224 × 224 × 3 boyutlarında biçimlendirilmiştir. Veri kümesi sağlam ve kusurlu olmak üzere iki etiketten oluşmaktadır. Şekil 6, iki sınıf için örnekleri içermektedir.



Şekil 5. Veri kümesi oluşturma a) Çelik sınırlarının belirlenmesi b) Çelik görüntüsünün orijinal görüntüden kırılması b) Kırılan görüntünün 4 eşit parçaya bölünmesi ve yeniden boyutlandırma



Şekil 6. Veri Kümesinden bazı örnek görüntüler a) Sağlam b) Deforme

## 2.2. Çift doğrusal evrişimli sinir ağı (Bilinear CNN)

Çelik üzerindeki kusurlar küçük olduğundan bir çelik üzerindeki kusurların tespiti oldukça zordur. Bu nedenle VGG16, MobileNetv2 gibi modeller kusur tespiti için çok iyi performans gösterememektedir. Veri kümesindeki farklı sınıflar arasındaki görüntüler birbirine benzer ise veri kümesindeki sorunların ayırt edilmesi oldukça zordur [23]. Bu görevi çözebilmek için genellikle, giriş görüntülerinin oldukça yerleştirilmiş niteliklerinin tanınması gerekmektedir. Örneğin, çelik görüntüsü üzerinde bulunan bir lekeyi delik kusurundan ayırt etmek için görüntüdeki ince farklılıkların tanınması gerekir. Son yıllarda en fazla kullanılan ve en gelişmiş tekniklerden olan derin öğrenme modelleri bile bu görevde başarısız olmaktadır. Yapılan araştırmalarda farklı uygulamalar için birçok CNN tabanlı ince taneli sınıflandırma yaklaşımı önerilmiştir. Bu çalışmada bu sorunu çözmek için çift doğrusal evrişimli sinir ağı (Bilinear CNN) kullanılarak sınıflandırma yapılmıştır [24].

İnce taneli nesne tanıma, bilgisayarlı görmede zorlu bir görevdir. Diğer temel düzey görüntü sınıflandırması yapan algoritmalardan farklı olarak ince taneli nesne tanıma, görüntü olarak benzer olan ancak arada az fark bulunan görüntüleri tanımaya odaklanır.

[24]'e göre, ince taneli görüntü sınıflandırması için çift doğrusal model Denklem 8'deki gibi açıklanabilir.

$$M = F(f_A, f_B, P, C) \quad (8)$$

Denklem 8’de  $M$  bilinear modeli,  $f_A$  ve  $f_B$  iki özellik çıkarıcıyı,  $P$  havuzlama fonksiyonunu ve  $C$  sınıflandırma fonksiyonunu temsil etmektedir. Özellik çıkarıcı Denklem 9’daki gibi tanımlanır. Bu işlev, görüntüleri ve konumları karşılık gelen özelliklere eşlemektedir.

$$f : \mathcal{L} \times \mathcal{J} \rightarrow \mathbb{R}^{c \times D} \quad (9)$$

Denklem 9’da  $\mathcal{J}$  görüntüleri teslim ederken  $\mathcal{L}$  konumları temsil etmektedir.  $\mathbb{R}$  bir boyutun özelliğidir  $\mathcal{L}$  genellikle konum ve ölçeği ifade eder.  $\mathbb{R}^{c \times D}$  ise  $c \times D$  boyutunda özelliklidir. Çift doğrusal karakteristikler elde etmek için,  $f_A$  ve  $f_B$ ’nin çıktısı her konumda Denklem 10’daki gibi birleştirilir. Çıktıları birleştirmek için her bir  $l$  konumundaki matris dış çarpımı kullanılır.  $l$  konumundaki  $f_A$  ve  $f_B$ ’nin bilinear özellik kombinasyonu bilinear olarak verilir. Denklemde verilen  $f_A$  ve  $f_B$ ’nin uyumlu olması için özellik boyutu  $c$  uyumlu olmalıdır.

$$(l, \mathcal{J}, f_A, f_B) = f_A(l, \mathcal{J})^T f_B(l, \mathcal{J}) \quad (10)$$

Görüntünün tüm konumlarındaki çift doğrusal özellikler  $P$  ile toplanır. Bu işlem, bir görüntü tanımlayıcısı elde etmek için gerçekleştirilir. Havuzlama, tüm konumların çift doğrusal özellikleri toplanarak gerçekleştirilir.

$$P(\mathcal{J}) = \sum l \in \mathcal{L}^{B(l, \mathcal{J}, f_A, f_B)} \quad (11)$$

$f_A, f_B$ , ile elde edilen öznitelikler sırasıyla  $C \times M$  ve  $C \times N$  boyutlarındaysa  $P(\mathcal{J})$   $M \times N$  boyutunda olur.  $P(\mathcal{J})$ ’nin  $MN \times 1$  boyutuna yeniden biçimlendirilmesiyle elde edilen çift doğrusal vektör, bir sınıflandırma fonksiyonu  $C$  ile kullanılabilen genel amaçlı bir görüntü tanımlayıcıdır.

## 2.3 Kullanılan önceden eğitilmiş CNN modelleri

### 2.3.1 MobileNetv2

Çalışmada kullanılan sınıflandırıcılardan biri MobileNetv2’dir. MobileNet’in geliştirilmiş versiyonu olan MobileNetv2’de doğruluk önemli ölçüde artırılmıştır [25]. MobileNetv2’nin seçilme nedeni yüksek doğruluk elde edebilirken düşük çıkarım süresine sahip olabilmesidir. Bu özelliği sayesinde sahada üretim hattında gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilme potansiyeli vardır. MobileNetv2 ağ mimarisi, 19 orijinal temel bloktan oluşur. Bu blokları, ortalama bir havuzlama katmanına sahip  $1 \times 1$  evrişim katmanı takip eder. Son katman bir sınıflandırma katmanıdır.

### 2.3.2 ResNet50

ResNet50, He Kaiming ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yayınlanan "Deep Residual Learning for Image Recognition" makalesinde tanıtılmıştır [26]. ResNet50, 1 maksimum havuzlama ve 1 ortalama havuz katmanı ile birlikte 48 evrişim katmanına sahip ResNet modelinin bir çeşididir. ResNet50, ResNet34’ün geliştirilmiş bir versiyonudur. Resnet34’teki 2 katmanlı blokların her biri, 3 katmanlı darboğaz bloğu ile değiştirilerek ResNet50 mimarisini oluşturmaktadır. Oluşturulan bu yapı, 34 katmanlı ResNet modelinden çok daha yüksek doğruluk oranına sahiptir.

### 2.3.3 VGG-16

Bu mimari, 16 katmandan oluşan düzgün bir mimariye sahiptir [27]. Evrişimli katmalar  $3 \times 3$  kıvrımlara ve çok sayıda filtreye sahiptir. Son yıllarda, sınıflandırma görevleri için oldukça popüler olmuştur. VGG-16, 138 milyon parametreden oluşur ve transfer öğrenme yöntemiyle elde edilir.

### 2.3.4 Xception

Xception, François Chollet tarafından tanıtılan Derinlemesine Ayrılabilir Evrişimleri içeren derin bir evrişimli sinir ağı mimarisidir [28]. Xception mimarisi, çoğu klasik sınıflandırma mücadelesinde VGG-16 ve ResNet gibi popüler ağlardan iyi performans göstermiştir.

## 2.4 Modeller için hiperparametreler

Tablo 1’de, modellerin eğitiminde kullanılan hiperparametreler verilmiştir. Giriş görüntüleri  $224 \times 224$  olarak belirlenip parti boyutu 4 olarak ayarlanmıştır. Modellerde öğrenme sürecini geliştirmek için Adam optimizyer kullanılmıştır. Döngü sayısı 50 olarak belirlenmiştir. Öğrenme oranı 0.001 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, kayıp işlevi olarak Kategorik Çapraz Entropi (Categorical Cross Entropy) ve aktivasyon fonksiyonu olarak Softmax kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Modellerde kullanılan hiperparametreler

Parametre	Değer
Görüntü Boyutu	$224 \times 224$
Parti Boyutu	4
Optimizyer	Adam
Döngü	50
Öğrenme Oranı	0.001

## 2.5. Performans ölçüm metrikleri

Sınıflandırma işlemi, eğitim, doğrulama ve test aşamalarından oluşur. Eğitim aşamasında modelin parametreleri ayarlanarak model eğitilir. Eğitim hatası ile modelin eğitim verilerine uyumu kontrol edilir. Eğitilen model genellikle eğitim verilerine uyacağı için eğitim hatası test hatasından daha küçüktür. Sınıflandırma algoritmalarının amacı eğitim verilerini kullanarak daha önce görmediği verilerin sınıfını tahmin etmeyi öğrenmektir. Doğrulama aşamasında modelin performansı değerlendirilir.

Sınıflandırma problemleri sınıf sayısına göre değişmektedir. Bu çalışmada, iki sınıflı sınıflandırma yapılmıştır. İki sınıftan pozitif sınıf için P ve negatif sınıf için N olarak belirlenmiştir. Şekil 7’de dört olası çıktıyı içeren karmaşıklık matrisi verilmiştir.

		Doğru sınıf	
		Pozitif	Negatif
Tahmin edilen sınıf	Pozitif	DP	YP
	Negatif	YN	DN

**Şekil 7.** Karmaşıklık Matrisi

Karmaşıklık matrisinde girdi görüntüsü gerçekte pozitifse ve pozitif olarak sınıflandırıldıysa, yani doğru sınıflandırılmış bir pozitif ise, doğru pozitif (DP) olarak değerlendirilir. Girdi görüntüsü gerçekte pozitifse ve negatif olarak sınıflandırılırsa, yanlış negatif (YN) olarak değerlendirilir. Girdi görüntüsü negatifse ve değerlendirme sonucu negatif ise doğru negatif (DN) olarak değerlendirilir. Son olarak girdi görüntüsü negatif iken sınıflandırma sonucu pozitif ise, yanlış pozitif (YP) olarak değerlendirilir. Karmaşıklık matrisi birçok ölçüm metriğini hesaplamak için kullanılır. Ölçüm metrikleri, sınıflandırma sonuçlarını değerlendirme önemli bir faktördür. Çalışmada kullanılan ölçüm metrikleri ve kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \quad (12)$$

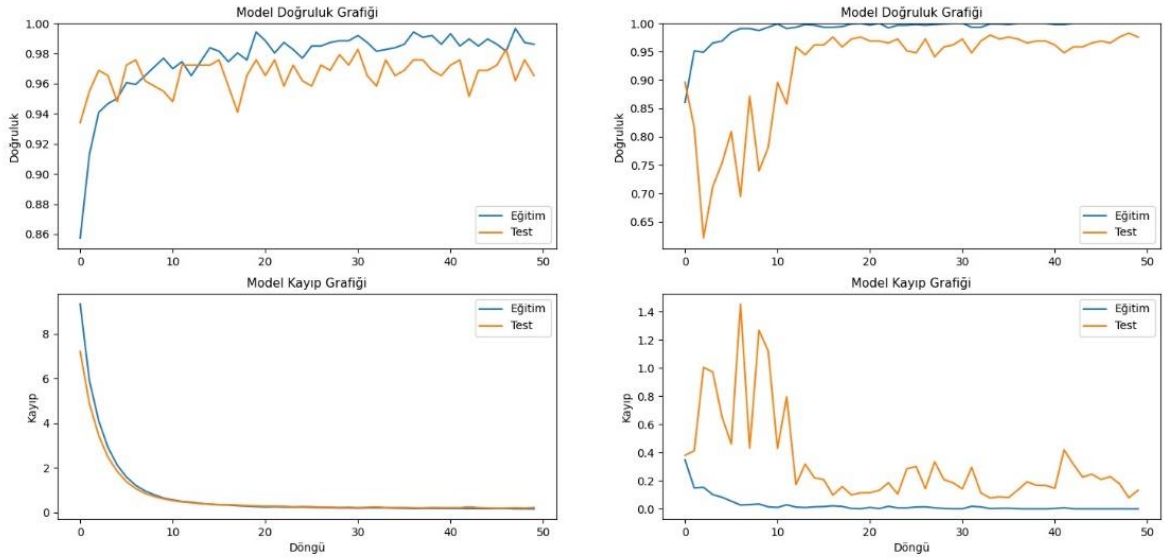
$$\text{Kesinlik} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (13)$$

$$\text{Geri Çağırma} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (14)$$

$$F1 = \frac{2 * \text{Geri Çağırma} * \text{Kesinlik}}{\text{Geri Çağırma} + \text{Kesinlik}} \quad (15)$$

### 3. Bulgular

Bu bölümde önerilen çift doğrusal CNN tabanlı yöntemin çelik yüzey kusurlarını sınıflandırma sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışmada, çift doğrusal modeller oluşturulan veri kümesindeki görüntülerin kusurlu ve sağlam olmak üzere sınıflandırılması için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar çift doğrusal olmayan modeller ile karşılaştırılmıştır. 600 sağlam ve 550 kusurlu görüntüden oluşan veri kümesinin %75'i eğitim için ve %25'i test için ayrılmıştır. Çift doğrusal yapının kusur tespiti üzerindeki etkinliğini kanıtlamak için dört farklı ağ yapısı kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında çift doğrusal CNN yapısının performans ölçüm metriklerinde üstün olduğu ve doğruluk sonuçlarını geliştirdiği gösterilmiştir. Çift doğrusal CNN tabanlı modellerde, kusur tespitinin çift doğrusal olmayan modellere göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, çift doğrusal CNN ağlarının görüntü üzerindeki detayları daha iyi öğrenebilmesidir. Her bir model için elde edilen model doğruluk grafiği ve model kayıp grafiği Şekil 8-Şekil 11'de gösterilmiştir. Ayrıca, her bir modelin karmaşıklık matrisi Şekil 12-Şekil 15'te gösterilmiştir.

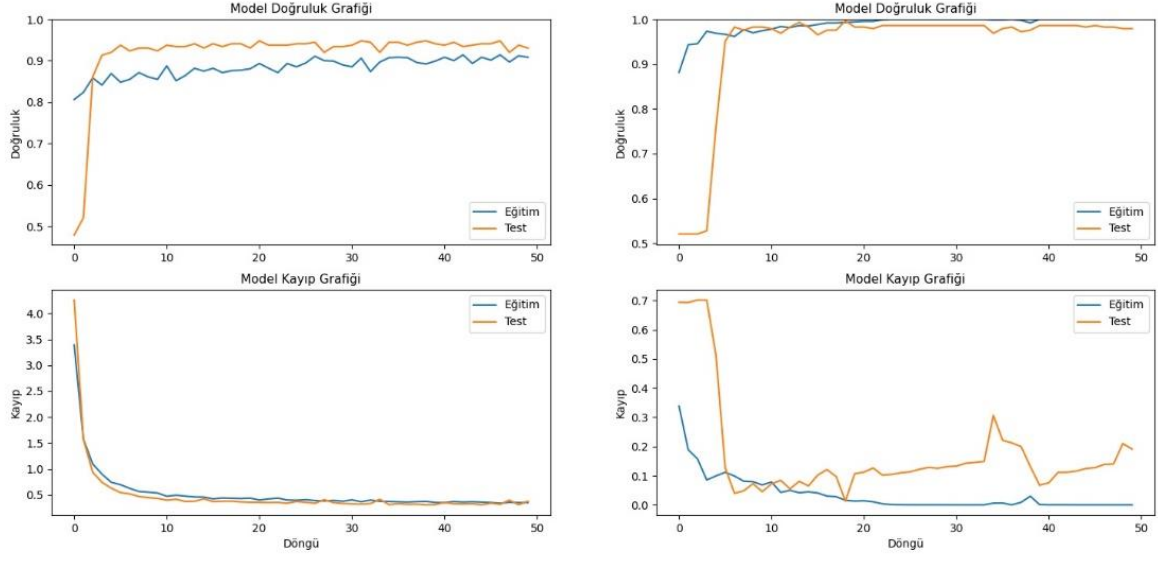


a) MobileNETv2

b) Çift Doğrusal MobileNETv2

Şekil 8. MobileNETv2 ve çift doğrusal MobileNETv2 grafik karşılaştırması

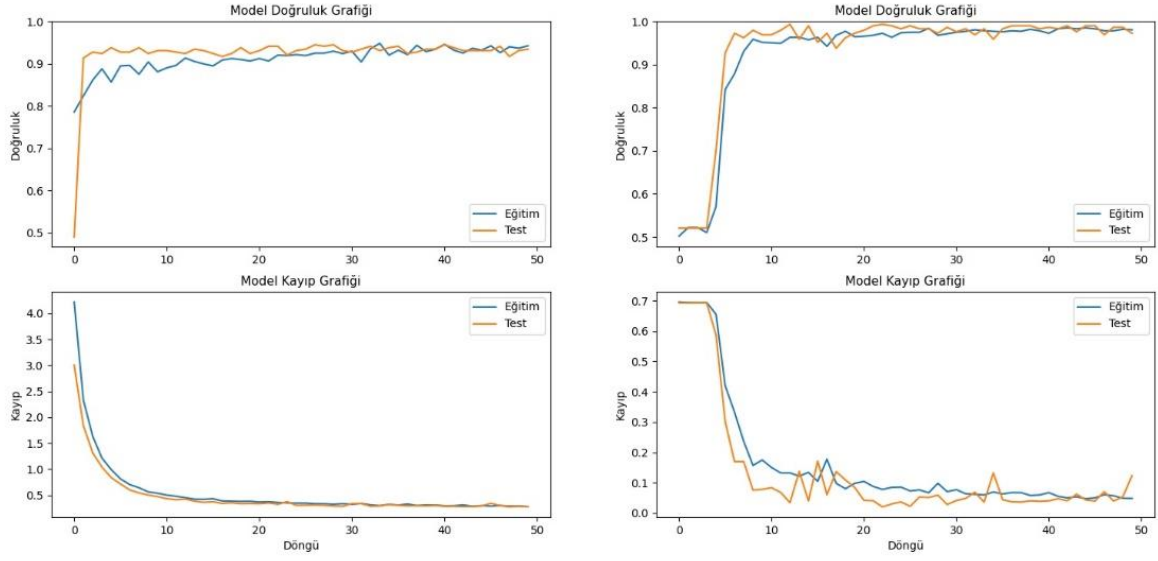
Çift Doğrusal CNN Kullanarak Çelik YüzeY Kusurlarının Sınıflandırılması



a) ResNet50

b) Çift Doğrusal ResNet50

Şekil 9. ResNet50 ve Çift Doğrusal ResNet50 grafik karşılaştırması

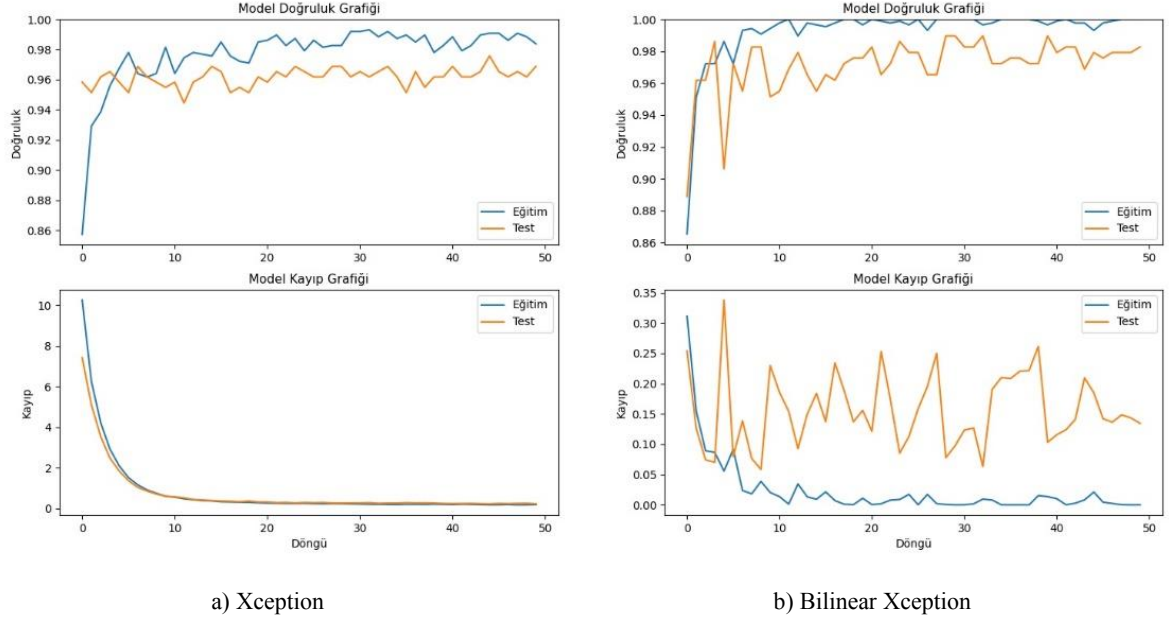


a) VGG16

b) Çift Doğrusal VGG16

Şekil 10. VGG16 ve Çift Doğrusal VGG16 grafik karşılaştırması

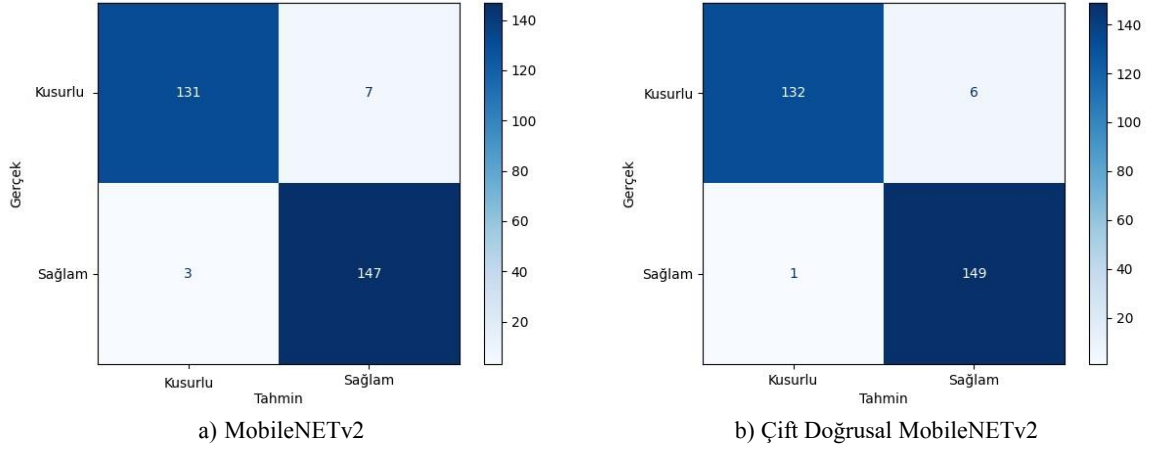




a) Xception

b) Bilinear Xception

Şekil 11. Xception ve Çift Doğrusal Xception grafik karşılaştırması

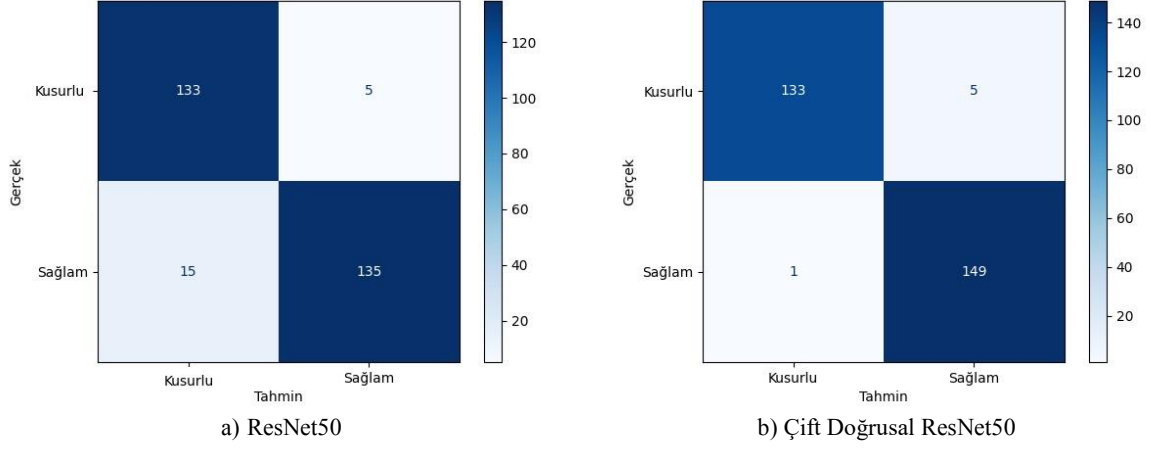


a) MobileNETv2

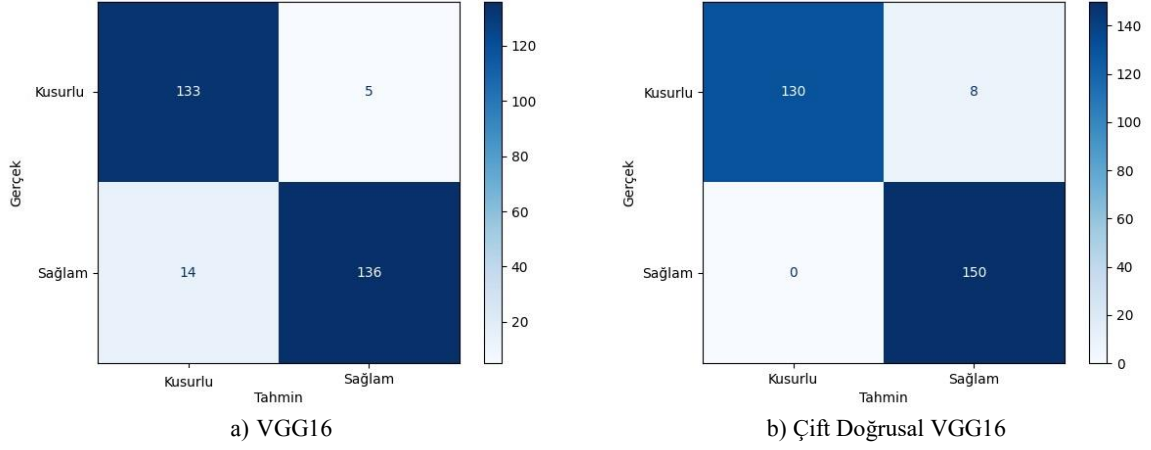
b) Çift Doğrusal MobileNETv2

Şekil 12. MobileNETv2 ve Çift Doğrusal MobileNETv2 karmaşıklık matrisi karşılaştırması

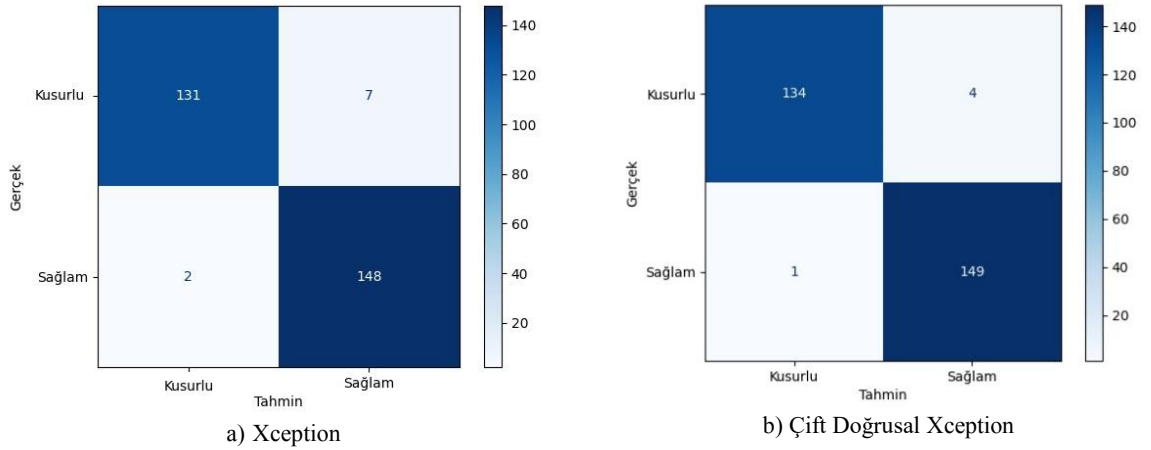
Çift Doğrusal CNN Kullanarak Çelik Yüzey Kusurlarının Sınıflandırılması



Şekil 13. ResNet50 ve Çift Doğrusal ResNet50 karmaşıklık matrisi karşılaştırması



Şekil 14. VGG16 ve Çift Doğrusal VGG16 karmaşıklık matrisi karşılaştırması



Şekil 15. Xception ve Çift Doğrusal Xception karmaşıklık matrisi karşılaştırması

Tablo 2’de, elde edilen tüm performans metrikleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde çift doğrusal mimari kullanılarak oluşturulan modellerin daha yüksek doğruluk oranı elde ettiği görülmüştür. Çift Doğrusal Xception modeli %98.26 doğruluk oranıyla en yüksek performansı elde ederken ResNet50 modeli %93.05 doğruluk oranı ile en düşük doğruluk oranını elde etmiştir.

**Tablo 2.** Elde edilen doğruluk sonuçları

Ağ Yapısı	Doğruluk (%)	Geri çağırma (%)	Kesinlik (%)	F1 (%)
MobileNetv2	96.52	98.0	95.45	96.71
Bilinear MobileNetv2	<b>97.57</b>	<b>99.33</b>	<b>96.12</b>	<b>97.70</b>
ResNet50	93.05	90.0	96.43	93.10
Bilinear ResNet50	<b>97.91</b>	<b>99.33</b>	<b>96.75</b>	<b>98.02</b>
VGG16	93.40	90.66	<b>96.45</b>	93.47
Bilinear VGG16	<b>97.22</b>	<b>100</b>	94.93	<b>97.40</b>
Xception	96.87	98.66	95.48	97.04
Bilinear Xception	<b>98.26</b>	<b>99.33</b>	<b>97.38</b>	<b>98.34</b>

#### 4. Sonuçlar

Çalışmanın başında da belirtildiği gibi çelik yüzey kusurlarının tespitinde yapay zekâ kullanımı oldukça uygundur, çünkü insan denetçiler ile karşılaştırınca yapay zekâ kullanılarak oluşturulan otomatik sistemlerin, maliyetleri düşürme potansiyelleri oldukça fazladır. Literatürden örnekler de incelendiğinde evrişimli sinir ağlarının bu görev için oldukça uygun bir yapı olduğu görülmektedir. Yüksek doğruluk oranı elde edebilen bir CNN modelinin endüstride kullanılma potansiyeli yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada çelik yüzey görüntülerinin sınıflandırma doğruluğunu artırmak için çift doğrusal CNN yapısı kullanılmıştır.

Genel olarak, bu çalışmada kullanılan yöntem çelik yüzey görüntülerinin sınıflandırılmasında yüksek doğruluk oranı elde etmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sınıflandırma işlemi için çift doğrusal CNN kullanımının doğruluk oranlarını geliştirdiğini göstermektedir. Bu nedenle, çift doğrusal CNN kullanımının özellikle küçük kusur çeşitleri üzerinde etkili olduğundan çelik yüzey görüntülerinin analizinde ve sınıflandırılmasında kullanılabilir uygun bir teknik olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılınca, çift doğrusal modellerin performansı ile diğer modellerin performansları arasında fark olduğu kanıtlanmıştır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 5210082 numaralı proje ile desteklenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Agarwal, K., Shivpuri, R., Zhu, Y., Chang, T. S., & Huang, H. (2011). Process knowledge based multi-class support vector classification (PK-MSVM) approach for surface defects in hot rolling. *Expert Systems with Applications*, 38(6), 7251-7262.
- [2] Choi, W., Huh, H., Tama, B. A., Park, G., & Lee, S. (2019). A neural network model for material degradation detection and diagnosis using microscopic images. *IEEE Access*, 7, 92151-92160.
- [3] Zhou, Q., Chen, R., Huang, B., Liu, C., Yu, J., & Yu, X. (2019). An automatic surface defect inspection system for automobiles using machine vision methods. *Sensors*, 19(3), 644.
- [4] Zheng, X., Zheng, S., Kong, Y., & Chen, J. (2021). Recent advances in surface defect inspection of industrial products using deep learning techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 35-58.
- [5] Jiahui, C. O. N. G., Yunhui, Y. A. N., & Dong, D. (2010). Application of Gabor filter in strip surface defect detection. *Journal of Northeast University (Natural Science Edition)*, 31(2), 257-260.
- [6] Ryu, S. G., Koo, G., & Kim, S. W. (2020). An adaptive selection of filter parameters: defect detection in steel image using wavelet reconstruction method. *ISIJ International*, 60(8), 1703-1713.

- [7] Mao, T., Ren, L., Yuan, F., Li, C., Zhang, L., Zhang, M., & Chen, Y. (2019, May). Defect recognition method based on HOG and SVM for drone inspection images of power transmission line. In 2019 international conference on high performance big data and intelligent systems (HPBD&IS) (pp. 254-257). IEEE.
- [8] Boudiaf, A., Benlahmidi, S., Harrar, K., & Zaghoudi, R. (2022). Classification of surface defects on steel strip images using convolution neural network and support vector machine. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(2), 531-541.
- [9] GÜÇLÜ, E., AYDIN, İ., ŞENER, T. K., & Erhan, A. K. I. N. Çelik Yüzeylerdeki Kusurların Tespiti için Derin Öğrenme Tabanlı Gömülü Sistem Tasarımı. *EMO Bilimsel Dergi*, 12(2), 27-33.
- [10] Konovalenko, I., Maruschak, P., Brezinová, J., Viňáš, J., & Brezina, J. (2020). Steel surface defect classification using deep residual neural network. *Metals*, 10(6), 846.
- [11] Gao, Y., Gao, L., Li, X., & Yan, X. (2020). A semi-supervised convolutional neural network-based method for steel surface defect recognition. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101825.
- [12] He, Y., Song, K., Meng, Q., & Yan, Y. (2019). An end-to-end steel surface defect detection approach via fusing multiple hierarchical features. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(4), 1493-1504.
- [13] Lee, S. Y., Tama, B. A., Moon, S. J., & Lee, S. (2019). Steel surface defect diagnostics using deep convolutional neural network and class activation map. *Applied Sciences*, 9(24), 5449.
- [14] Fu, G., Sun, P., Zhu, W., Yang, J., Cao, Y., Yang, M. Y., & Cao, Y. (2019). A deep-learning-based approach for fast and robust steel surface defects classification. *Optics and Lasers in Engineering*, 121, 397-405.
- [15] Gao, Y., Gao, L., Li, X., & Yan, X. (2020). A semi-supervised convolutional neural network-based method for steel surface defect recognition. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101825.
- [16] Li, M., Wang, H., & Wan, Z. (2022). Surface defect detection of steel strips based on improved YOLOv4. *Computers and Electrical Engineering*, 102, 108208.
- [17] Karaduman, G., Aydin, I., Akin, E., & Özdemir, S. (2022, August). Detection of the Steel Faults Based on Deep Learning. In 2022 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA) (pp. 1-2). IEEE.
- [18] Zhou, F., Liu, G., Xu, F., & Deng, H. (2019). A generic automated surface defect detection based on a bilinear model. *Applied Sciences*, 9(15), 3159.
- [19] Liu, T., Zheng, P., Chen, H., & Zhang, L. (2023). An attention-based bilinear feature extraction mechanism for fine-grained laser welding molten pool/keyhole defect recognition. *Journal of Manufacturing Processes*, 87, 150-159.
- [20] Tang, Z., Tian, E., Wang, Y., Wang, L., & Yang, T. (2020). Nondestructive defect detection in castings by using spatial attention bilinear convolutional neural network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(1), 82-89.
- [21] Yang, D., Cui, Y., Yu, Z., & Yuan, H. (2021). Deep learning based steel pipe weld defect detection. *Applied Artificial Intelligence*, 35(15), 1237-1249.
- [22] Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), 62-66.
- [23] Luo, J. H., & Wu, J. X. (2017). A survey on fine-grained image categorization using deep convolutional features. *Acta Autom. Sin.*, 43(8), 1306-1318.
- [24] Lin, T. Y., RoyChowdhury, A., & Maji, S. (2015). Bilinear CNN models for fine-grained visual recognition. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 1449-1457).
- [25] Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. (2018). Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4510-4520).
- [26] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
- [27] Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*.
- [28] Chollet, F. (2016). Xception: deep learning with depthwise separable convolutions (2016). *arXiv preprint arXiv:1610.02357*.

## Derin Sıfıraltı Isıl İşlemin Bimetallerin Bazı Mekanik Özelliklerine Etkisi

Zafer ÖZDEMİR<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Haliç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
<sup>1</sup> ozdemirzafer@yahoo.com

(Geliş/Received: 31/07/2023;

Kabul/Accepted: 26/02/2024)

**Öz:** Bu çalışmada kırıcı sanayiinde kullanılan bimetallerin mekanik özelliklerine derin sıfır altı-kriyojenik işlemin (DKİ) etkisi incelenmiştir. Son yıllarda yüksek sertliğin yanısıra yüksek tokluk ihtiyacının da olduğu darbeli kırıcılarda bimetal kompozitler yüksek manganlı östenitik çeliklerin yerine yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Konvansiyonel ısıl işlem bimetallerde uygulanmakla beraber, çalışmamızda sıfıraltı işlemin malzemenin belirli mekanik özelliklerine etkisi ve içyapı analizi de incelenmiştir. İnceleme 800°C de tavlama, -180°C de derin sıfır altı işlem 250°C de temperleme, charpy darbe testi, optik mikroskop analizi, tarayıcı elektron mikroskop analizi, X-Ray analizini ve sertlik ölçümlerini içermektedir. Her sette 5 adet deney numunesi olmak üzere 2'şer set bimetal malzeme önce 5 saat süre ile tavlama işlemine tabii tutulmuş, ardından 24 saat sıfır altı işleme ve 3-4 saat süre ile de temperleme işlemine tabii tutulmuştur. Darbe tokluk deneyleri ve sertlik ölçümleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak derin sıfır altı işlem sonrası tokluk ve sertlik değerlerinde önemli değişimlerin ortaya çıktığı görülmekte olup, aynı zamanda temiz bir içyapı ve homojen bir bileşimin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Derin Sıfıraltı İşlem+Temperleme sonrası numunelerin darbe tokluğunun sadece Derin Sıfıraltı İşlemi sonrasına kıyasla ortalama %20 arttığı ve sertlik oranlarının ise %10 azaldığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kriyojenik sıfıraltı işlem, bimetal, çentik darbe testi, yüksek alaşımlı krom dökme demir, düşük alaşımlı çelik.

### Effect of Deep Cryogenic Heat Treatment to Some Mechanical Properties of Bimetals

**Abstract:** Deep cryogenic (subzero) treatment (DCT) is at great importance when high toughness and hardness is aimed to obtain in metal industry. Bimetals have a great importance in crushing industry also. DCT influence on the mechanical properties of bimetals have been examined and analyzed in the current study. Examinations include annealing at 800°C, DCT, tempering at 250°C, charpy impact test, optic microscope (OM) images analysis, scanning electron microscope images analysis, X-RAY images analysis and hardness measurement as Rockwell C. Bimetals (2 set each, 1 set is 5 sample) are put to annealing at 800°C for 5 hours, then DCT is conducted at -180°C for 24 hours. Tempering is followed out at 250°C for 3 hours for 1 set. Noteworthy hardness and toughness rates are observed after DCT. It was also observed that after DCT and tempering, hardness is reduced, but impact energy/toughness is increased. A clean microstructure has been observed after DCT in OMs and SEMs. X-RAY analysis also reveals pure and clean chemical composition. The impact toughness rates of samples after DCT+Tempering are determined %20 more compared with the rates after DCT. Hardness rates decreases %10 after DCT+Tempering compared with the rates after DCT.

**Key words:** Subzero cryogenic treatment, bimetal, impact test, high alloy cast iron, low alloy steel.

#### 1. Giriş

Bimetaller, yüksek mekanik özellikleri nedeniyle kırıcı ve darbeli yük ile çalışan endüstrilerde kullanılan önemli yapısal metalik malzemelerdir [1]. Yaklaşık son kırk yılda geliştirilmişler ve özellikle Hadfield çeliği gibi yüksek manganlı çelik alaşımlarına ciddi bir alternatif olmuşlardır [2]. Yüksek aşınma direnci özellikleri ve darbe dayanımları nedeniyle son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [3].

Mekanik özelliklerini iyileştirmek ve artık gerilmeleri ortadan kaldırmak için döküm işleminden sonra geleneksel ısıl işlem yöntemleri uygulanmaktadır [4]. Ancak yüksek tokluk ve darbe dayanımına ihtiyaç duyulduğunda, konvansiyonel ısıl işlemin yanı sıra alternatif bir yöntem olan Derin Kriyojenik İşlem (DKİ) de uygulanabilmektedir. DKİ'de; metaller yüksek sıcaklıklardan (800-900°C) yaklaşık 24 saat boyunca sıvı azot uygulanarak -180°C'ye kadar düşürüldükten sonra yaklaşık 250°C'de temperleme işlemine tabii tutulabilmektedir [5,6].

<sup>1\*</sup> Sorumlu yazar: [ozdemirzafer@yahoo.com](mailto:ozdemirzafer@yahoo.com) Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7919-5642

Bu yöntem sayesinde yüksek tokluk ve sertlik değerleri elde edilebilmektedir. Bu özellikler aşınma direnci ve darbe dayanımı için çok önemlidir [7]. Konvansiyonel ısıl işlem prosesi, sıg kriyojenik işlem ve bimetallerin mekanik özellikleri daha önceki çalışmalarında Z.Özdemir tarafından incelenmiştir [8,9]. Bugüne kadar bimetallerin kriyojenik işlemi üzerine yapılan bazı önemli çalışmalar aşağıda belirtilmiştir.

M.Ş. Adin ve M.Okumuş, AISI 420 ve AISI 1018 çeliklerinin metal kaynağının mikro yapısını ve mekanik özelliklerini araştırmış, çekme testleri yapmış ve sertlik değerlerini ölçmüş ve dikkate değer sonuçlar elde etmişlerdir [10]. M.Ş.Adin ayrıca kriyojenik işlemin kesici takımlar üzerindeki etkisini [11] ve MIG ve TIG kaynaklı farklı çelik bağlantılarının mekanik özelliklerine kriyojenik işlemin etkisini [12] incelemiştir.

Çalışmamızın bilimsel amacı, HCCI ve LCS bimetallik dökümlerin tokluk, sertlik ve metalografi açısından incelenmesi, DCT ve DCT+Temperleme sonrası karşılaştırılmasıdır. DCT ve DCT+Temperleme işlemlerinin etkisi tokluk ve sertlik açısından karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

İncelemeler için yüksek krom alaşımlı dökme demir [13] ve düşük alaşımlı çelik [14] seçilmiştir (Tablo 1-2).

**Tablo 1.** Düşük karbonlu çelik kimyasal analizi (%)

C	Si	Mn	P	Al	Cu	Cr
0,17	0,20	1,40	0,045	0,005	0,15	0,13
Ni	Mo	W	S	V	Fe	
0,06	0,01	0,001	0,042	0,05	kalan	

**Tablo 2.** Yüksek alaşımlı dökme demir (G-X300CrMo27) kimyasal analizi (%)

C	Si	Mn	P	Al	Cu	Cr
3,10	0,398	0,822	0,002	-	0,135	21,8
Ni	Mo	W	S	V	Fe	
0,47	1,60	-	0,059	-	kalan	

Süreç 5 adımdan oluşmaktadır:

1. Döküm
2. Isıl İşlem/DKİ/Temperleme (Şekil 1)
3. Darbe Testleri,
4. OM/SEM/X-RAY'ler
5. Sertlik Testi.

Yapılan işlemler bulgular bölümünde açıklanmıştır. Kimyasal bileşim Tablo 1 ve 2'de gösterilmiştir. OM Nikon Eclipse LV 150 ile, SEM/X-RAY analizi FEI/Quanta 450 FEG ile, kimyasal analiz BAIRD-DVG Spektrometresi ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik değerleri Rockwell C olarak test edilmiştir [15]. Tüm numuneler, işlemler başlamadan önce standart; ASTM E23-02 "Metalik Malzemelerin Çentikli Çubuk Darbe Testi için Standart Test Yöntemleri" [16] uyarınca Charpy Darbe Testi numunesi olarak hazırlanmış, daha sonra süreçteki işlemler tatbik edilmiştir.

## 3. Bulgular

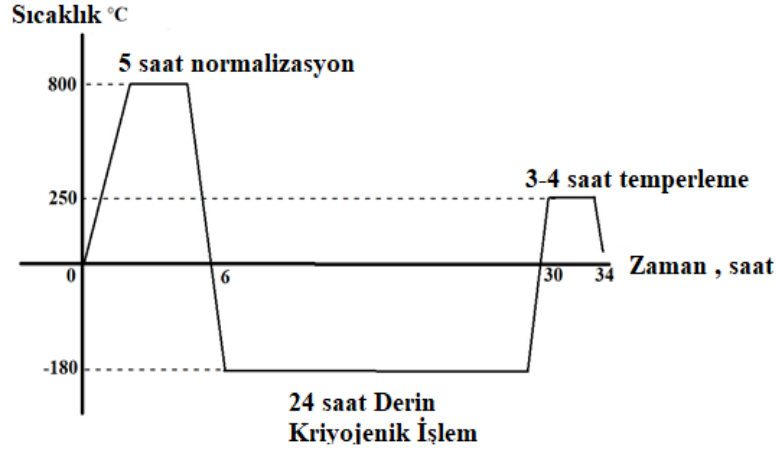
### 3.1. Döküm süreci

Döküm işlemi kum kalıba döküm olarak gerçekleşmiş, önce 1580°C'deki sıvı metalin (düşük karbonlu çelik) döküm işlemi gerçekleştirilmiş, ara yüzey sıcaklığı Pt-PtRh13 termokupl kullanılarak ölçülmüştür. Uygun sıcaklık elde edildikten sonra, oksidasyonu önlemek ve iki farklı malzeme bileşimine sahip metaller arasında kalıcı bir bağlantı elde etmek için sıvı düşük karbonlu çeliğe döküm işleminin hemen akabinde bir aktivatör (bor ve sodyum karışımı) eklenmiştir. Hemen ardından 1420°C'de yüksek kromlu beyaz dökme demirin döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

### 3.2. Isıl işlem/DKİ/temperleme süreci:

Tavlama, Şekil 2'de gösterilen bimetallere (2 katman, biri yüksek alaşımlı dökme demir ve diğer katman düşük alaşımlı çelik) 800°C'de 5 saat boyunca gerçekleştirilir [17].

Tavlama sonrası, DKİ -180°C'de 24 saat boyunca gerçekleştirilir. DKİ'den sonra, 1 grup (5 numune) için 250°C'de 5 saat süreyle temperleme işlemi gerçekleştirilmiş ve ikinci grup (5 numune) oda sıcaklığına getirilmiştir (Şekil 1). [18].



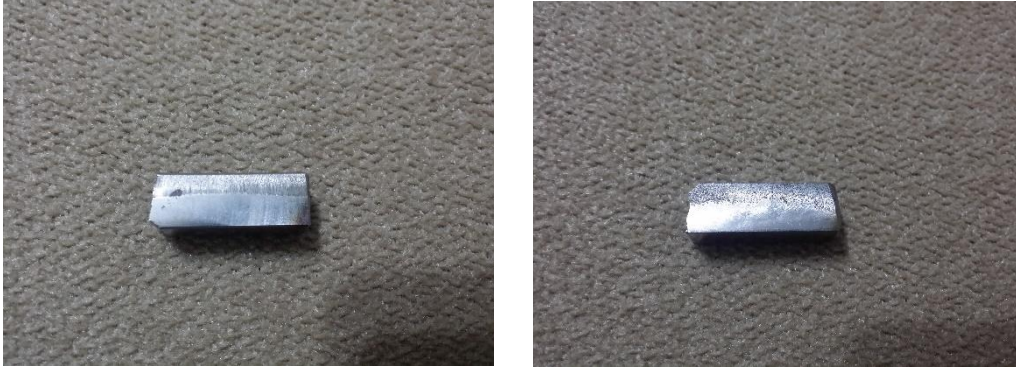
Şekil 1. Isıl İşlem (Normalizasyon Tavı)/DKİ/Temperleme

### 3.3. Charpy darbe testleri

Darbe testleri ASTM E23-02 "Metalik Malzemelerin Çentikli Çubuk Darbe Testi için Standart Test Yöntemleri" ne uygun olarak gerçekleştirilir [16]. Test parçaları bimetal dökümlerden alınmış ve Şekil 2'de görüldüğü gibi DKİ/Temperleme ve DKİ öncesi ayrı ayrı ayarlanmıştır. Tablo 3 ve 4'teki sonuçlar elde edilmiştir.



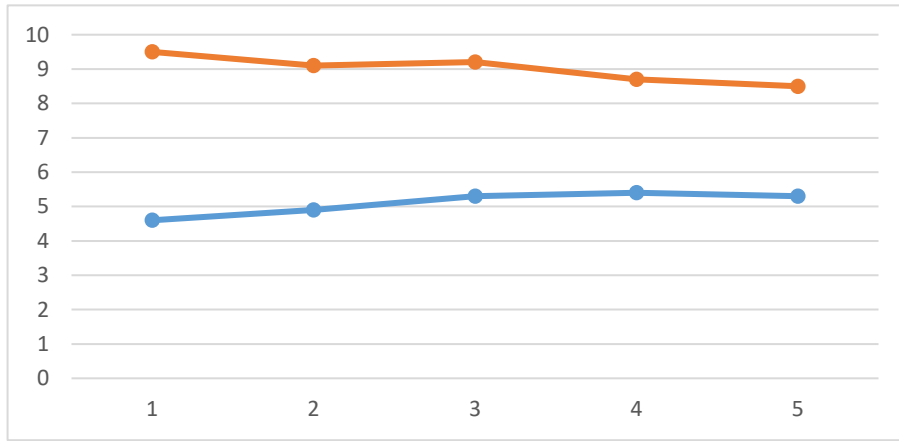
Şekil 2. Charpy darbe test numunesi



Şekil 3. Charpy darbe test numunesi (deneyden sonra)

Table 3. Charpy darbe testi sonuçları (DKİ sonrası)

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5
Darbe Enerjisi (J.) (Çentik tarafı Düşük-Karbonlu Çelik)	4,6	4,9	5,4	5,3	5,4
Darbe Enerjisi (J.) (Çentik tarafı Yüksek Kromlu Dökme Demir)	9,5	9,1	9,2	8,7	8,5

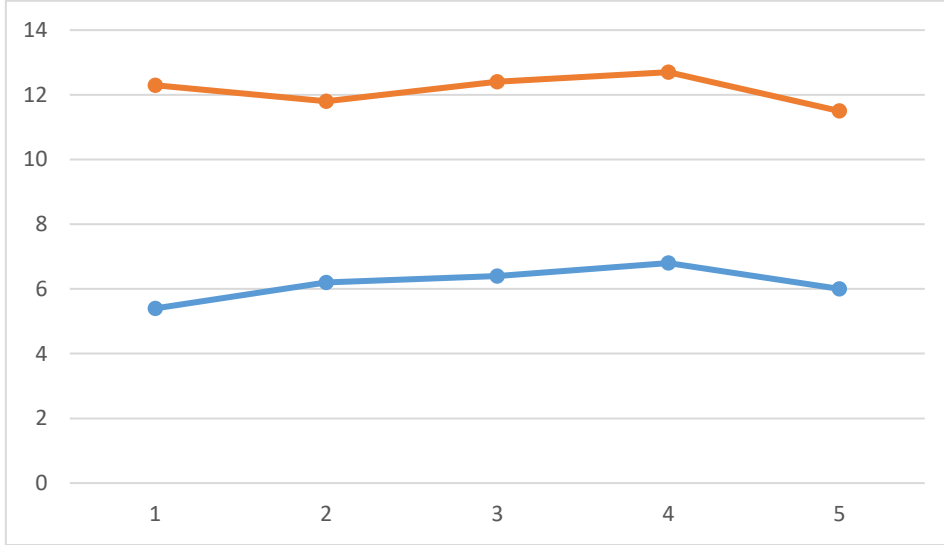


Şekil 4. Tablo 3'deki verilere göre Charpy darbe testi kırılma enerjisi (y-ekseni) (Joule), (x-ekseni-numuneler-5 adet) turuncu yüksek kromlu dökme demirdir, mavi düşük karbonlu çeliktir. (DKİ sonrası)

Table 4. Charpy darbe testi sonuçları (DKİ+temperleme sonrası)

	Numune 1	Numune 2	Numune 3	Numune 4	Numune 5
Darbe Enerjisi (J.) (Çentik tarafı Düşük-Karbonlu Çelik)	5,4	6,2	6,4	6,8	6,0
Darbe Enerjisi (J.) (Çentik tarafı Yüksek Kromlu Dökme Demir)	12,3	11,8	12,4	12,7	11,5

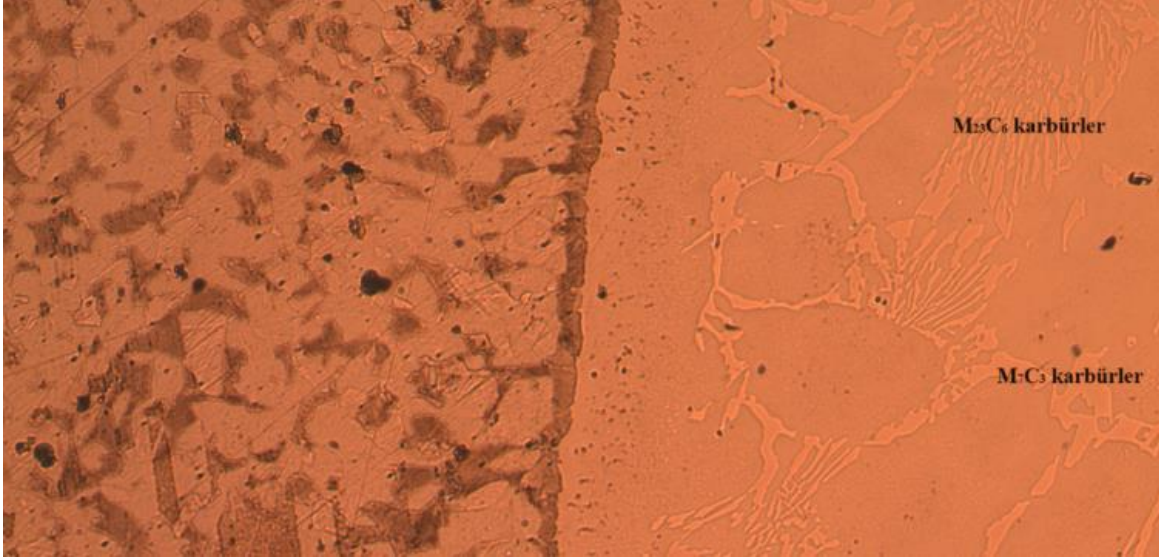




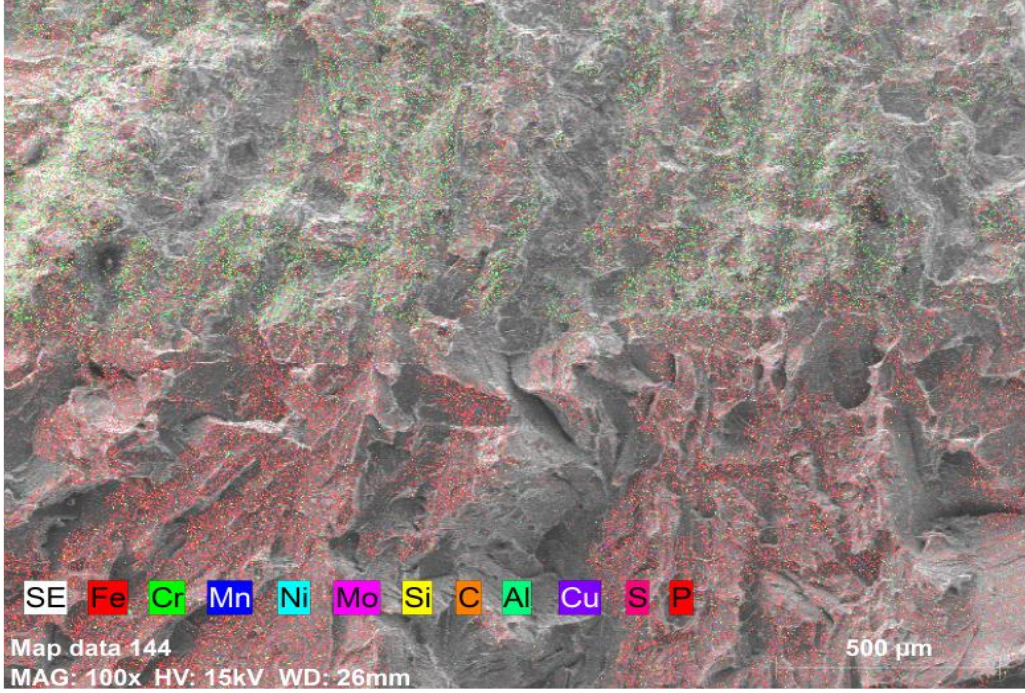
**Şekil 5.** Tablo 4'deki verilere göre Charpy darbe testi kırılma enerjisi (y-ekseni)(Joule), (x-ekseni-numuneler-5 adet) turuncu yüksek kromlu dökme demirdir, mavi düşük karbonlu çeliktir. (DKİ+temperleme sonrası)

### 3.4. DKİ sonrası ve DKİ/temperleme sonrası mikroyapı (OM/SEM/X-RAYs)

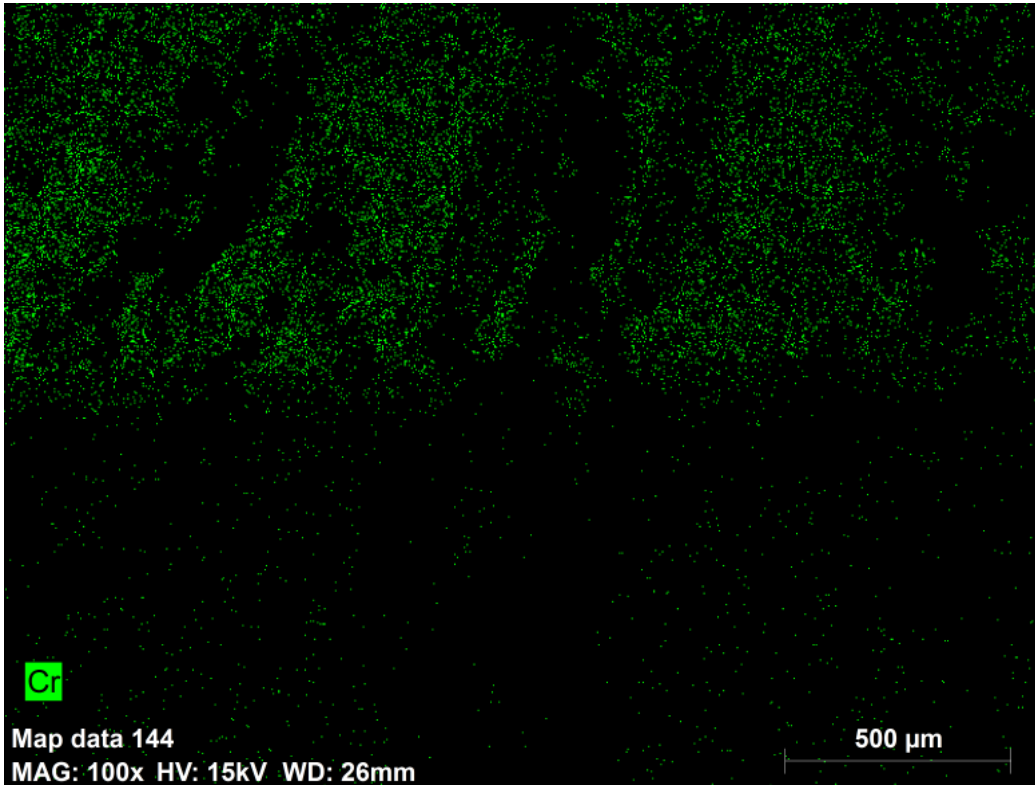
DKİ ve DKİ/Temperleme sonrasında numunelerin mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Karbürler bimetallerde tokluk ve sertliği etkiler. Yüksek kromlu dökme demir bileşimindeki molibden karbürler ( $M_{23}C_6$  ve  $M_7C_3$ ) hem sertliği hem de tokluğu artırmaktadırlar.



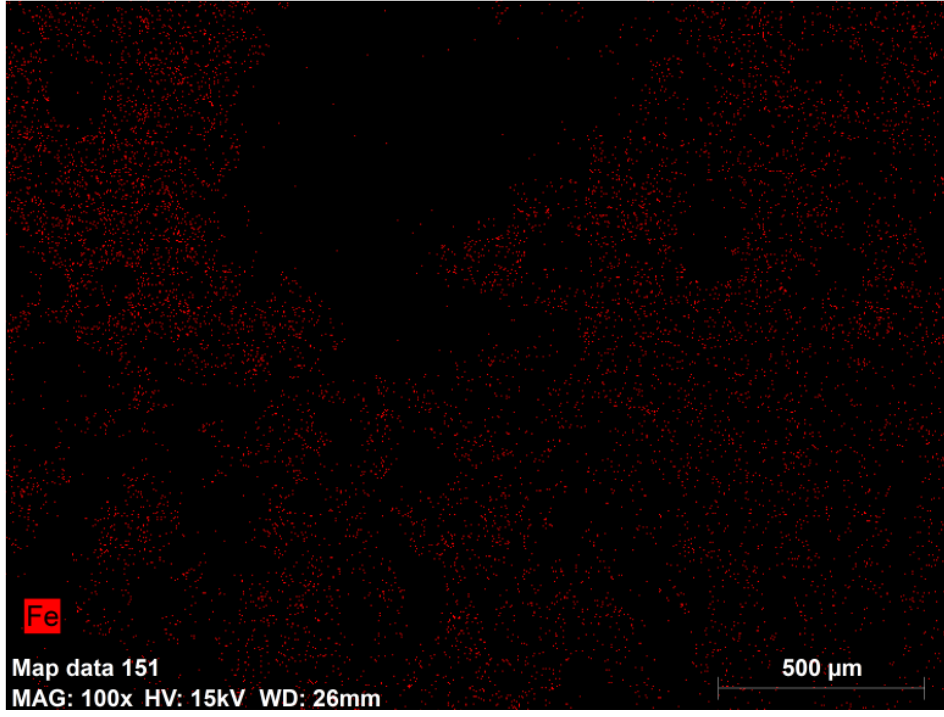
**Şekil 6.** DKİ/temperleme sonrası optik metalografi (400 X)



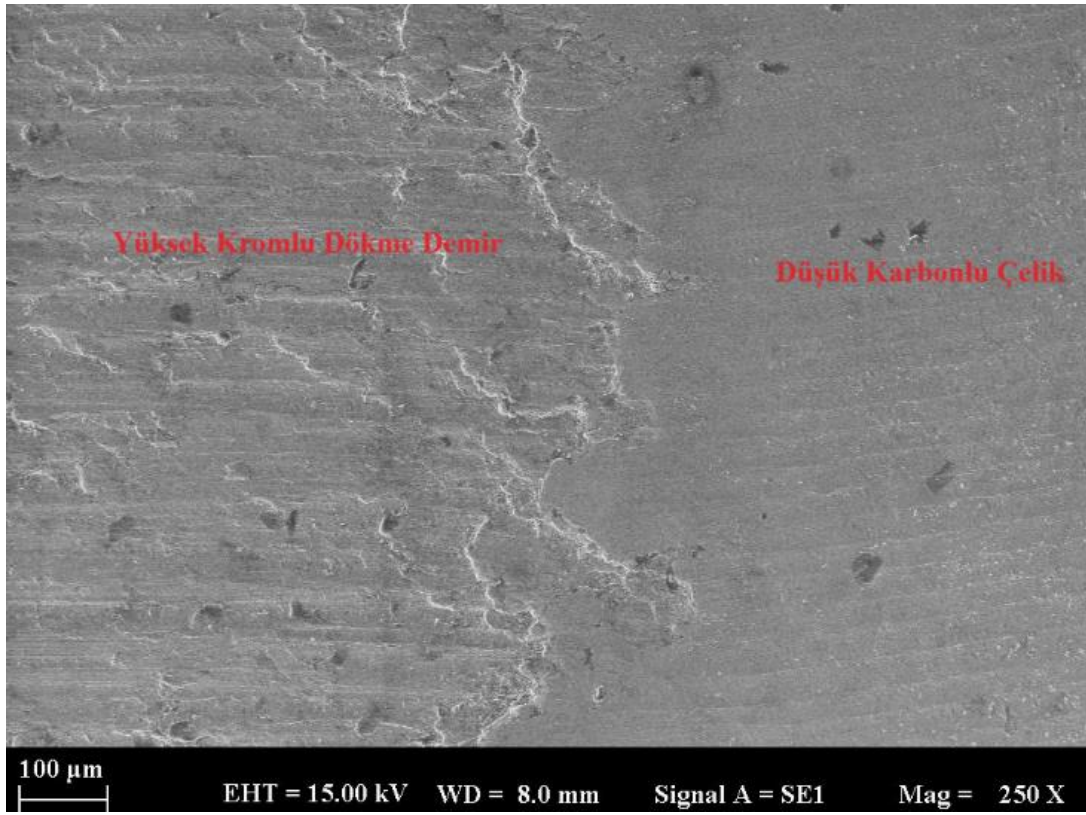
Şekil 7. DKİ/temperleme sonrası X-Ray analizi (tüm yapı)



Şekil 8. DKİ/temperleme sonrası SEM ve X-Ray analizi (krom)



Şekil 9. DKİ/temperleme sonrası SEM ve X-Ray Analizi (ferrit)



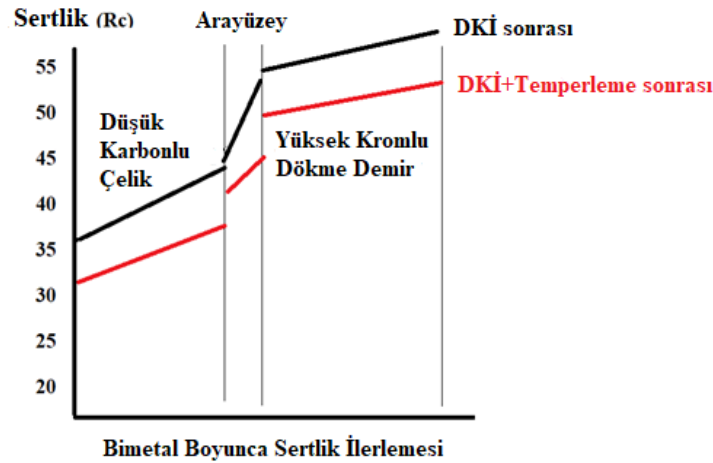
Şekil 10. DKİ/temperleme sonrası SEM analizi (250 X)

### 3.5. Sertlik

Sertlik oranları numunelerin 3 farklı noktasından Rockwell C olarak alınmıştır [15]. DKİ ve DKİ+Temperleme sonrasında sertlik değerlerinin ve tokluk değerlerinin eş zamanlı olarak arttığı (Şekil 11) gözlemlenmiştir [8,9].

**Tablo 5.** Sertlik değerleri

DKİ Sonrası Bimetal Sertlik Değerleri								
Düşük Karbonlu Çelik (HRC)			Arayüzey (HRC)			Yüksek Kromlu Dökme Demir (HRC)		
36,6	37,4	38,2	49,2	53,2	46,7	54,2	56,5	55,6
DKİ+Temperleme Sonrası Bimetal Sertlik Değerleri								
Düşük Karbonlu Çelik (HRC)			Arayüzey (HRC)			Yüksek Kromlu Dökme Demir (HRC)		
32,3	31,5	31,2	42,1	43,5	43,3	52,5	51,3	50,7



**Şekil 11.** Sertlik ilerlemesi

### 4. Tartışma

Çalışma yazarın önceki çalışmaları [8,9] ile karşılaştırıldığında DKİ'ye tabi tutulan numunelerin sertlik ve tokluklarında dikkate değer ve eş zamanlı bir artış gözlenmiştir. Bununla birlikte, temperlemeden sonra sertlikte küçük bir düşüş gözlenmiştir. Aynı zamanda, tokluk değerlerinde bir artış açıkça görülmektedir. SEM ve OM görüntüleri, bimetalin iç yapısını ve malzeme dağılımı ortaya koymaktadır. (Şekil 6 ve 10). X-Ray analizi de yüksek alaşımlı dökme demir ve düşük alaşımlı çelik bileşenin mükemmel uyumunu ve bileşimini göstermektedir (Şekil 7).

DKİ sonrasında; bimetalin sertlik oranları ve darbe tokluğu aynı anda artar. Bu olguyu, X-Ray görüntülerinde görüldüğü gibi bimetal bileşenlerinin homojen dağılımının büyük ölçüde etkilediğini açıklayabiliriz (Şekil 7,8,9). İç yapı ve döküm hatası gözlenmemiştir, bu nedenle kayda değer sonuçlar elde edilmiştir. Bunu özellikle karbon difüzyonunun etkisi ve ötektik karbürlerin, özellikle  $M_7C_3$  ve  $M_{23}C_6$  karbürlerinin çökmesi ile açıklayabiliriz (Şekil 6).

## 5. Sonuçlar

Çalışma konvansiyonel ısıl işlem ve derin kriyojenik işlem açısından aşağıdaki sonuçları ortaya koymaktadır. DKİ'den sonra sertlik ve toklukta eşzamanlı artış gözlemlenmiştir. Temperleme sonrası sertlikten bir miktar ödün vererek tokluk artışı gözlemlenmiştir. X-Ray analizinde (Şekil 7.) görüldüğü gibi homojen bir element dağılımı görülmektedir. Karbürler, bimetalin daha sert tarafındaki yüksek kromlu dökme demir tarafında Cr miktarına bağlı olarak yüksek sertliğin yanı sıra yüksek tokluk sağlar.

## Kaynaklar

- [1] S Zic, I Dzambas, ve M Ikonic. Possibilities of Implementing Bimetallic Hammer Castings in Crushing Industries, *Metalurgija* 2009; 48(1): 51–54.
- [2] X Xiaofeng, Y Shengping, Z Xiaoguang, ve X Qiong. High Cr White Cast Iron/Carbon Steel Bimetal Liner by Lost Foam Casting with Liquid-liquid Composite Process, *China Foundry* 2012; 9(2):136–142.
- [3] X Xiao-Feng, Y Sheng-Ping, Y Wei-Xin, ve X Qiong. HCWCI/Carbon Steel Bimetal Liner by Liquid-Liquid Compound Lost Foam Casting, *Journal Of Iron And Steel Research International* 2012; 19(0): 13-19.
- [4] ASM Handbook Volume 4, Heat Treating ASM Handbook, Volume 4A, Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. ASM International.pp. 382–386. ISBN 978-1-62708-011-8. 2013.
- [5] I Reddy, Dr Y S Rao, A S P Seshank, ve V Inturi. Characterization and Performance Evaluation of HSS Cutting Tools under Deep Cryogenic Treatment, *International Journal of Engineering And Science* 2015; 5(10): 13-19.
- [6] K Prudhvi, ve V V Lakshmi. Cryogenic Tool Treatment, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*, 2016; 2(9): 1204-1211.
- [7] T Yugandhar, P K Krishnan, C V B Rao, ve R Kalidas. Cryogenic Treatment and It's Effect on Tool Steel, 6th International Tooling Conference 2002; Vol:2: 672-683.
- [8] Z Özdemir. Effect of Heat Treatment on the Impact Toughness of 'High-Chromium Cast Iron – Low-Carbon Cast Steel' Bi-Metal Components, *Metal Science and Heat Treatment* 2017; Vol. 58: 738-741.
- [9] Z Özdemir. Shallow cryogenic treatment (SCT) effects on the mechanical properties of high Cr cast iron – low-carbon cast steel bimetallic casting, *Int. J. Metalcast* 2021; 15(3): 952-961.
- [10] M Ş Adin, ve M Okumuş. Investigation of Microstructural and Mechanical Properties of Dissimilar Metal Weld Between AISI 420 and AISI 1018 Steels, *Arabian Journal for Science and Engineering* 2022; 47:8341–8350.
- [11] M Ş Adin. Performances of cryo-treated and untreated cutting tools in machining of AA7075 aerospace aluminium alloy, *European Mechanical Science* 2023; 7(2): 70-81.
- [12] M Ş Adin. A parametric study on the mechanical properties of MIG and TIG welded dissimilar steel joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022.
- [13] DIN EN 12513:2001, "Abrasion Resistant Cast Irons". English Version Of DIN EN 12513 (Foreign Standard). 2001.
- [14] ASTM A27M "Standard Specification For Steel Castings, Carbon, For General Application". 2006.
- [15] ASTM E18-02 "Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials" (2004).
- [16] ASTM E23-02 "Standart Test Methods For Notched Bar Impact Testing Of Metallic Materials". 1982.
- [17] George H.T. "Steel Heat Treatment Metallurgy and Technologies", Second Edition, Portland State University Of Portland, 148-150. 2006.
- [18] I.S. Jawahir and Colleagues "Cryogenic Manufacturing Processes", *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Isıl İşlem <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.007>. 2016.



## Evrşimsel Sinir Ağları Kullanarak ÇKA Sınıflandırıcısı ile Mide Displazisinin Tespiti

Seda SAĞIROĞLU<sup>1\*</sup>, Seda ARSLAN TUNCER<sup>2</sup>, Birgül KARAHAN<sup>3</sup>, İbrahim Hanifi ÖZERCAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Yazılım Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Fethi Sekin Şehir Hastanesi, Tıbbi Patolog, Elazığ, Türkiye

<sup>4</sup> Fırat Üniversitesi Tıp Fakültesi, Tıbbi Patolog, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> sesagiroluu@gmail.com, <sup>2</sup> satuncer@firat.edu.tr <sup>3</sup> gri-36@hotmail.com, <sup>4</sup> ozercan@yaho

(Geliş/Received: 08/08/2023;

Kabul/Accepted: 22/03/2024)

**Öz:** Son yıllarda Dünya’da ve Türkiye’de yapılan araştırmalarda da görüldüğü üzere mide kanseri diğer kanser türlerine oranla ilk sıralarda yer almaktadır. Tespit edilme açısından da oldukça zorluk çekilen bir kanser türü olarak bilinmektedir. Mide displazisi, midenin iç yüzeyini kaplayan hücrelerin normal şekilde büyümesini ve gelişmesini durdurmasıdır. Bu hücreler, kontrolsüz bir şekilde büyümeye ve çoğalmaya başlarlar, sonrasında mide kanserine dönüşmektedirler. Bu hastalığı kansere dönüşmeden en aza indirgeyebilmek temel hedeftir. Mide displazisi düşük dereceli ve yüksek dereceli displazi olmak üzere iki şekilde ayrılır. Yüksek dereceli displazi, kanserin bir öncesidir. Bu yüzden mide displazinin tanı ve tedavisi için erken dönemde teşhis son derece önem taşımaktadır. Bu çalışmada, mide displazinin tespiti için derin öğrenme ve evrşimsel sinir ağları teknikleri kullanılarak displazi durumunun erken evrede tespiti amaçlanmaktadır. Çalışmada histopatolojik görüntüler üzerinde birden fazla Evrşimsel Sinir Ağları (ESA) modeli kullanılarak özellik çıkarma işlemi yapılmıştır. Hasta ve sağlıklı olmak üzere iki etiket sınıfına ayrılan veri derin öğrenme mimarileri ve sınıflandırıcılar yardımıyla karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Derin Öğrenme, Mide Displazi, Sınıflandırma, Evrşimsel Sinir Ağları(ESA), Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA).

### Detection of Stomach Dysplasia by MLP Classifier using Conventional Neural Networks

**Abstract:** As seen in research conducted in the world and in Turkey in recent years, stomach cancer ranks first compared to other types of cancer. It is known as a type of cancer that is very difficult to detect. Gastric dysplasia is when the cells lining the inner surface of the stomach stop growing and developing normally. These cells begin to grow and multiply uncontrollably, then turn into stomach cancer. The main goal is to minimize this disease before it turns into cancer. Gastric dysplasia is divided into two types: low-grade and high-grade dysplasia. High-grade dysplasia is a precursor to cancer. Therefore, early diagnosis is extremely important for the diagnosis and treatment of gastric dysplasia. This study aims to detect dysplasia at an early stage by using deep learning and convolutional neural networks techniques for the detection of gastric dysplasia. In the study, feature extraction was performed on histopathological images using multiple Convolutional Neural Networks (ESA) models. The data, divided into two label classes: patient and healthy, were compared with the help of deep learning architectures and classifiers.

**Key words:** Deep Learning, Gastric Dysplasia Classification, Convolutional Neural Networks (CNN), Multi-layer Perceptron (MLP).

### 1. Giriş

Mide kanseri, dünyada en sık görülen beş kanser türünden biridir [1]. Görülme sıklığı dünya genelinde büyük farklılıklar göstermektedir [1]. Mide kanseri, en sık Japonya ve Çin’de görülürken üçüncü sırayı Avrupa takip etmektedir. Amerika’da 2013 yılında 21.600 yeni mide kanseri vakası ve yaklaşık 10.990 mide kanserine bağlı yaşam kaybı olduğu tahmin edilmektedir. Ülkemizde 2020 yılında Dünya Sağlık Örgütü’ne göre yaklaşık 2 milyon kişiye mide kanseri teşhisi konulmuştur. Mide kanseri en sık görülen kanser türleri arasında yer alır. Erkeklerde 5. sırada, kadınlarda ise 6. sırada yer aldığı görülmektedir. Türkiye’de yapılan bir çalışmada mide kanseri teşhis konma yaşı ortalama 57 olarak tespit edilmiştir. Bölgelerin karşılaştırılması ile ülkemizin doğu bölgesinde kanser teşhisi konan hastaların sosyoekonomik durumu, batı bölgesine göre daha düşük bulunmuştur. Son 50 yıldaki araştırmalara bakıldığında mide kanseri oluşumu ve kansere bağlı yaşam kaybı oranlarında azalma görülmektedir. Bu azalmanın sebebi; tedavideki gelişmelerden ziyade, yaşam koşullarının iyileştirilmesi ve beslenme açısından düzenli, yeşil sebze ve meyve gibi gıdaların tüketilmesidir [2]. Mide kanserini iki ana başlık altında toplarsak biri çevresel faktörler diğeri ise genetik faktörlerdir. Bunlar içerisinde yaş

\* Sorumlu yazar: [sesagiroluu@gmail.com](mailto:sesagiroluu@gmail.com) . Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7319-8597, <sup>2</sup> 0000-0001-6472-8306, <sup>3</sup> 0000-0003-0276-8219, <sup>4</sup> 0000-0002-8781-8838

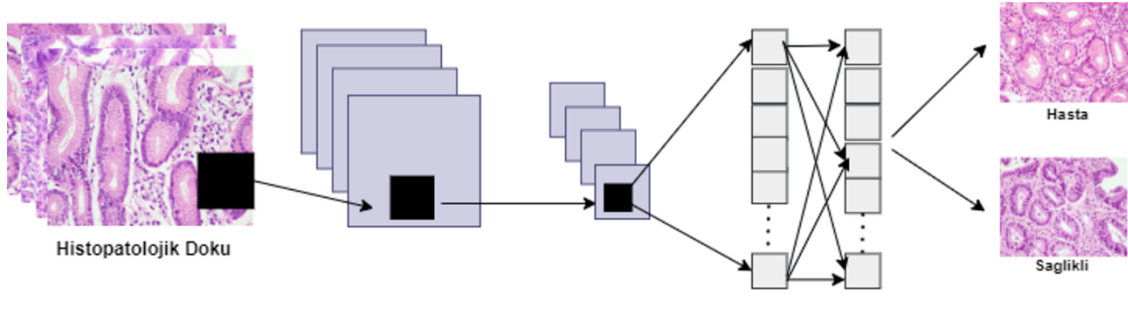
ve cinsiyet gibi bazı faktörler arasında kuvvetli ve değiştirilemez bir ilişki vardır. Beslenme şekli, sigara kullanımı, alkol, aile geçmişi gibi bazı etkenler risk faktörünü oluşturmaktadır.

Displazi, ileride kansere dönüşebilme ihtimali olan hücrelerin bozulmasıyla meydana gelir. Displazi'nin 2'li veya 3'lü sınıflandırmaları vardır. Çoğunlukla düşük dereceli ve yüksek dereceli displazi olmak üzere iki kısma ayrılır. Yüksek dereceli displazi, kanserin bir öncesi olarak görülmektedir.

Kanser şüphesi olan doku ışık mikroskobu altında incelenmektedir. Histopatolojik durum dokularda oluşan değişikliklerin çeşitli yöntemler aracılığıyla mikroskopta incelenmesine olanak sağlar. Mide kanserini erken evrede evrede saptayabilmek adına bazı görüntüleme yöntemleri vardır; Baryumlu Garfiler, Endoskopi, Bilgisayarlı Tomografi, Manyetik Rezonans Görüntüleme gibi bilgisayar destekli görüntüleme yöntemleri hasta üzerinde tanı konulması için oldukça önemlidir [3].

Derin öğrenme; makinelerin insan beyni gibi davranan, algılayabilen ve analiz yapabilen popüler makine öğrenmesi yaklaşımlardan biridir. Teknolojinin gelişmesi ve makine kapasitelerinin artmasıyla kullanımı günden güne artmaktadır. Derin öğrenme tıp, yüz tanıma, sürücüsüz araçlar, görüntü analizleri, konuşma, sanal yardımcılar, çeviri, duyu tanıma gibi birçok alanın çözümünde sıkça kullanılmaktadır. Karar destek sistemleri ile hekime yardımcı sistem olarak tıp alanında da kullanımı oldukça yaygındır. Mide displazi tanısı için histopatolojik görüntüler üzerinde önceden eğitilmiş ESA modelleri kullanılarak derin öğrenme algoritması aracılığıyla sınıflandırmaya dayanmaktadır.

Bu çalışmada mide displazisi görüntüleri kullanılarak elde edilen veriler, hasta ve sağlıklı olmak üzere iki etiket sınıfına ayrılmıştır. En iyi sınıflandırıcı performansını veren çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) sınıflandırıcısı ile MobileNet derin öğrenme mimarisi kullanılarak elde edilmiştir.



**Şekil 1.** Mide histopatoloji görüntüleri kullanılarak önerilen karar destek sistemi

Yukarıda yer alan Şekil 1'de, mide displazisine ait histopatolojik görüntüler kullanılarak çalışmaya ait karar destek sistemine yer verilmiştir.

## 2. Literatür İncelemesi

Literatürde Mide displazi çalışmalarından çok mide kanseri ile ilgili çalışmalara rastlanmaktadır. Yapılan çalışmalarda mide kanseri tanısı için derin öğrenme tabanlı yaklaşımlarla alınan sonuçlar analiz edilmiştir.

Ikenoyama ve ark. ESA'ların erken evre mide kanseri için endoskopistlerle tanısal yeteneklerini karşılaştırdı. Tek atışlı çoklu kutu dedektörüne dayalı bir ESA modelini eğitmek için ilk olarak 2639 mide kanseri lezyonundan 13.584 endoskopik görüntü kullandılar. Daha sonra bu modelin performansı, bir test veri seti kullanılarak 67 endoskopist ile karşılaştırıldı. Bu model ve endoskopistler arasındaki deneysel sonuçların karşılaştırılmasından sonra önerilen ESA modelinin deneyimli endoskopistlerden (%31,9) açıkça daha yüksek bir duyarlılığa (%58,4) sahip olduğu bulundu. Ayrıca bu modelin teşhis süresinin, endoskopistlerinkine kıyasla önemli ölçüde daha kısa olduğu görülmüştür [4].

Hirasawa ve ark. 13.000'den fazla ÖzofagoGastroDuodenoskopi (ÖGD) görüntüsüyle eğitilmiş, derin öğrenmeye dayalı bir tanı sistemi önerdi. Sistem, Single Shot Detector (SSD) adı verilen derin bir sinir ağı mimarisini kullandı. ESA katmanlarına ince ayar yapmak için stokastik bir gradyan iniş stratejisi kullanırken algoritmasını değiştirmede. ESA, 77 mide kanseri lezyonunun 71'ini %92,2 hassasiyetle doğru bir şekilde tanıdı ve 161 kanserli olmayan lezyon mide kanseri olarak tespit etti ve %30,6'lık bir pozitif prediktif değerleri ile



sonuçlandı. Ayrıca çapı 6 mm ve üzeri olan 71 lezyonun 70'i (%98,6) ve tüm kanser hücrelerinin başlangıç yeri olan üst katmanından daha ileri yayılma göstermesi, kesin olarak tespit edilmiştir [5].

Sakai ve ark. kanser ve kanser olmayan iki tür kategorinin ayrıntılı doku bilgisini kullanarak ince ayarlı bir transfer ESA modeli önerdi. Erken mide kanserlerinin yakın yerlerini gösterme, duyarlılık ve özgüllük açısından dengeli bir doğruluk elde etme yeteneğine sahiptir. Deneysel sonuçlar, eğitilmiş modellerinin doğruluğunun, duyarlılığının ve özgüllüğünün sırasıyla %87,6, %80,0, %94,8 olduğunu ve %93,4'lük yüksek bir pozitif prediktif değerleri ile doğru saptamanın mümkün olduğunu böylece kusuru telafi ettiğini gösterdi [6].

2019 yılında Cao ve ark. mide kanserinin saptanmasını gerçekleştirmek ve kanser çekirdeğinin segmentasyonu için maske bölgesi tabanlı bir ESA yöntemi geliştirdi. Model iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, tüm görüntü temel ESA tarafından taranarak, ilgi bölgeleri oluşturmak için bölge teklif ağına beslenen özellik haritaları oluşturuldu. Ardından ikinci kısım sınırlayıcı kutular ve maskeler üretti. Sonuçlar, bu yöntemin %61,2'lik bir oranla ortalama kesinlik değerine sahip bir test sonucu elde ettiğini doğruladı [7].

Li ve ark. erken mide kanseri teşhisi için ESA'ya dayalı bir sistem ve olağanüstü bir doğruluk (%90,91), duyarlılık (%91,18) ve özgüllük (%90,64) ile dar bant görüntülemeli, büyüteçli endoskopinin bir kombinasyonunu kullandılar [8].

Shibata ve ark. ayrıca endoskopik görüntülerde mide kanseri lezyonlarını otomatik olarak saptamak ve segmentlere ayırmak için ESA'yı kullanan bir yöntem önerdi. ESA omurgası olarak artık bir ağ ResNet kullandılar; dal maskesi, tamamen evrişimli bir ağın yedi evrişim katmanından oluşmaktadır. Performans değerlendirmesi olarak beş kat çapraz doğrulama kullanıldığında bu modelin duyarlılığı %96,0 olmuştur. Mide kanseri bölgesinin segmentasyonunun değerlendirilmesinde ortalama zar indeksi %71 olarak belirlendi. Önerilen yöntem mide kanserinin saptanması ve gastrointestinal endoskopide kanserli bölgenin analizi için faydalı olmuştur [9].

Zhang ve ark. kronik atrofik gastrit tanı oranını iyileştirmek için DenseNet121 kullanarak, CAG-Net adında bir ESA oluşturdu. Modeli eğitmek ve doğrulamak için beş katlı çapraz doğrulama kullanıldı. 3042 atrofik gastrit görüntüsü ve 2428 normal görüntü kullanıldı. Modelin tanınma doğruluğu, duyarlılığı ve özgüllüğü sırasıyla; 0,942, 0,945 ve 0,940 idi. Hafif, orta ve şiddetli atrofik gastrit tespit oranları sırasıyla; %93, %95 ve %99 elde edildi [10].

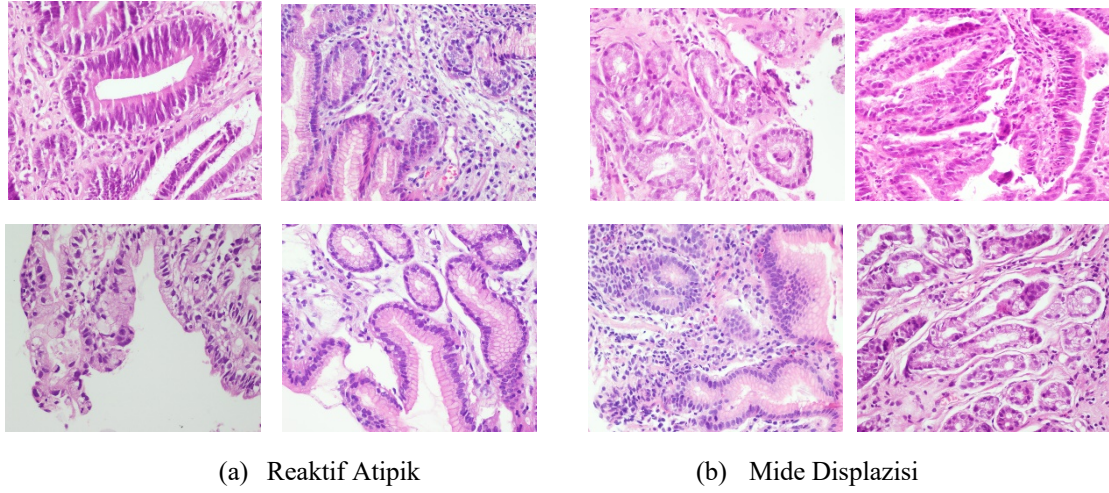
Shi ve ark. gastrik epitelyal rejenerasyon değişikliğini displaziden ayırt etmek için bir derin öğrenme yöntemi geliştirdi. Endoskopik numunelerin 897 tam slayt görüntüsü üzerinde eğitim, dahili doğrulama ve harici doğrulama gruplarına ayrıldı. Model performansını tahmin etmek için deneylerin doğruluk, duyarlılık, özgüllük pozitif ve negatif prediktif değerleri hesaplanarak ölçülen tanılama performansı %97 bağımsız harici doğrulama kohortunda, model makro ortalama doğruluğu 0,67'den 0,82'ye yükseltti [11].

Yapılan literatür çalışmaları karşılaştırıldığında çalışmamız hem yüksek doğruluk oranı hem de daha gelişmiş modeller kullanarak başarı göstermiştir. Aynı zamanda kendi verilerimizi kullanmamız çalışma için bir artı oluşturmuştur.

### **3. Materyal Metot**

#### **3.1. Materyal**

Çalışmada, Elazığ Fethi Sekin Şehir Hastanesi'ne ait patoloji arşivinde bulunan 2019 Ocak ayı ile 2020 Mart ayları arasında kullanılan 2 grup veri kullanılmıştır. 1. grup, değerlendirilen ve "reaktif atipik değişiklikler" olarak raporlanan 492 biyopsi örneklerine ait. 2. grup " mide displazisi" olarak raporlanan 501 mide antrum endoskopik biyopsi örneklerine ait H-E boyalı kesitlerden oluşmaktadır. Her iki gruba ait örnekler en az 4 saat boyunca nötr tamponlu %10 formalin içinde sabitlenmiş, %70 etanolde yıkanmış, standart yöntemlerle işlenmiş, parafine gömülmüş, 5 um'lik kesitler halinde kesilerek, hematoksilin ve eozin ile boyanmıştır. H-E boyalı kesitler gastropatoloji alanında deneyimli uzman patolog tarafından ışık mikroskobu ile taranarak Olympus DP26 kamera sistemi ile dijital ortama aktarılmıştır. Toplam 993 görüntü elde edilmiştir.



Şekil 2. Reaktif Atipik ve Mide Displazisine ait örnek görüntüler

Yukarı da yer alan Şekil 2’ de her iki gruba ait (a) reaktif atipik değişiklikler (b) mide displazisi olarak raporlanan biyopsi örneklerine ait görüntüler yer almaktadır.

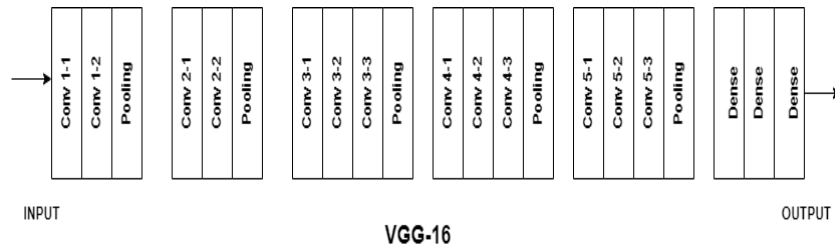
### 3.2. Metot

Son zamanlarda görüntü sınıflandırması için derin öğrenme teknikleri kullanılmaktadır. ESA; evrişim katmanı, havuzlama ve tamamen bağlı katmandan oluşan çok katmanlı bir sinir ağıdır. Evrişim katmanı, giriş verileri üzerinde evrişim işlemi gerçekleştiren ESA'nın temel yapısıdır. Evrişim, iki matris, yani alıcı alan ve çekirdek arasındaki bir iç çarpım işlemi temsil etmektedir. Genel olarak çekirdek uzamsal olarak giriş verilerinden daha küçüktür. Çekirdek alıcı alan üzerinde kaymakta ve giriş verilerinin bir özellik haritasını oluşturmaktadır. Havuzlama katmanının buradaki görevi, özellik haritasının uzamsal boyutunu düşürmektir. Bir dizi çıktıyı yakındaki özellik değerlerinin istatistiklerine göre tek bir değerle değiştirmektedir. En yaygın kullanılan havuzlama tekniği maksimum havuzlamadır. Bir dizi özelliği maksimum değeriyle değiştirmektedir. Tamamen bağlı katman, tüm nöronların birbirini takip eden her katman nöronuna bağlı olduğu çok katmanlı bir algılayıcıdır. Bu katman, özellikleri çıktıya haritalamak için tercih edilmektedir [12].

Bu çalışmada histopatolojik görüntülerden elde edilen, önceden eğitilmiş ESA mimarileri ile mide displazisi tespiti gerçekleştirilecektir. Mide displazi durumunu tahmin edebilmek için VGG16, VGG19, MobileNet, NasNet ve ResNet ESA mimarilerden faydalanılmaktadır. Aşağıda kullanılan mimariler açıklanmaktadır.

#### 3.2.1. VGG-16

VGG-16, basit bir ağ modeli olup öncesindeki modellerden en önemli farkı evrişim katmanlarının 2’li ya da 3’lü olarak kullanılmasıdır. Tam bağlantı (FC) katmanında  $7 \times 7 \times 512 = 4096$  nöronlu bir öznitelik vektörüne dönüştürülür. İki FC katmanı çıkışında 1000 sınıflı softmax başarımı hesaplanır ve milyonlarca parametre hesabı yapabilmektedir. Diğer modellerde olduğu gibi girişten çıkışa doğru matrislerin yükseklik ve genişlik boyutları azalırken kanal sayısı artmaktadır [13]. Yapılan bu çalışmada VGG-16’nın katmanlı mimarisi kullanılarak model eğitimi yapılmıştır. Kullanılan mimarinin yapısı aşağıdaki şekildeki Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. VGG-16 katman yapısı

### 3.2.2. VGG-19

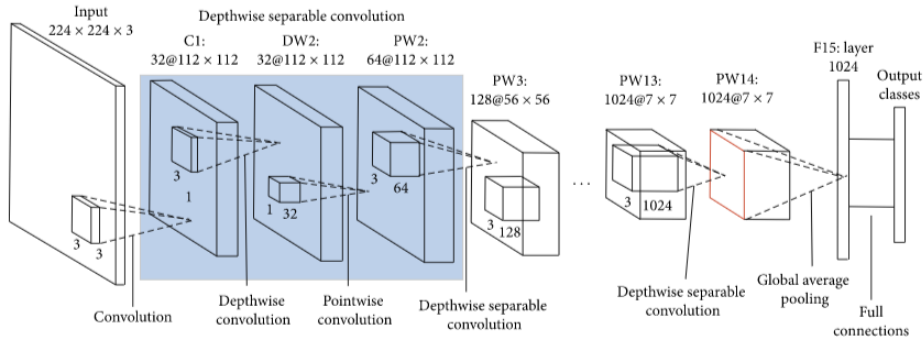
VGG19, ILSVRC 2014 yarışmasında ikinci olan topluluk tarafından VGGNet olarak adlandırılıyor. Simonyan ve Zisserman tarafından geliştirildi. VGG 19, 5 ortaklama katmanı ve 3 tam bağlı katmanda sona eren 16 evrişim katmanından meydana gelmektedir. ReLU, aktivasyon fonksiyonlarıyla tanımlı bir derin öğrenme modelidir. Modelde bilgi çok önemli değere sahiptir çünkü ESA'da maksimum ortaklama katmanı kullanılıp, önceki katmanın çok sayıda piksel değeri işlemden atılır ve sadece en yüksek değeri tutulur [13].

### 3.2.3. ResNet

ResNet, daha önceki mimarilerden daha derin bir yapısı olan ve 152 katmandan oluşan bir mimaridir. ImageNet yarışmasında 2015 yılında çok düşük hata oranı elde ederek kazanan olmuştur. Bu oran, insan hata oranını geçerek büyük bir başarı anlamına gelmektedir. Mimariyi oluşturan Residual bloklarda, x girişi konvolüsyon-ReLU konvolüsyon serisinden sonra bir F(x) sonucu üretmektedir. ResNet'in evrişimsel sinir ağlarıyla birlikte görüntü işleme ve görüntü tanıma gibi birçok soruna yüksek teknolojik çözümler sunmuştur [14].

### 3.2.4. MobileNet

MobileNet, mobil vizyon uygulamaları için basit ama verimli ve hesaplama açısından da çok yoğun olmayan evrişimli sinir ağıdır. MobileNet; nesne algılama, ince taneli sınıflandırmalar, yüz nitelikleri ve yerelleştirmeyi içeren birçok gerçek dünya uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelde amaç, parametre ve hesaplama sayısını azaltırken aynı zamanda performansını mümkün olduğunca korumaktır [15]. Aşağıda MobileNet'in yapısı, Şekil 4'te gösterildiği gibi derinlemesine ayrılabilir filtrelere dayanmaktadır.



Şekil 4. MobileNet ağ yapısı [16]

### 3.2.5. NasNet

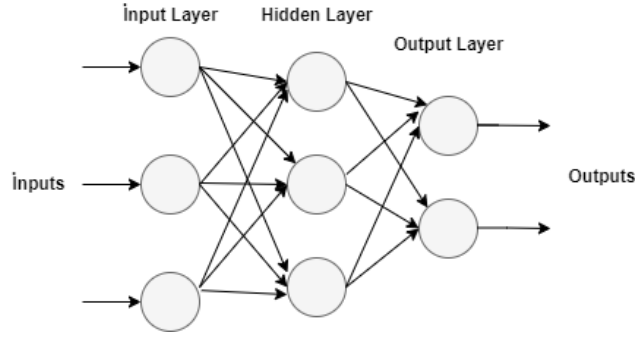
NASNet, eğitilecek veri kümesi için evrişimsel sinir ağı mimarisinin eğitim işlemi sırasında oluşturulmasını sağlar. Temel olarak filtre boyutu, çıkış kanalları, katman sayısı vb. parametrelerin en iyi birleşimini aramaktadır.

Her arama işleminden sonraki ödül, veri seti üzerinde aranan mimarinin doğruluğuna göre hesaplanmaktadır. NASNet'te genel mimari önceden tanımlanmış olsa da hücreler önceden tanımlanmamıştır. NASNet ağındaki bulunan hücreler normal hücre ve indirgeme hücresidir. Normal hücreler, aynı boyutta bir özellik haritası döndüren evrişimli hücrelerdir. Azaltma hücreleri, özellik haritası yüksekliği ve genişliğinin iki kat azaltıldığı bir özellik haritası döndüren evrişimli hücrelerdir [17].

Çalışmada VGG16, VGG19, ResNet, MobileNet ve NasNet modelleri kullanılarak yapılan özellik çıkarma sonucu elde edilen özellikler, DVM, KNN ve ÇKA sınıflandırıcıları kullanılarak üç ayrı sınıfa ayrılmıştır.

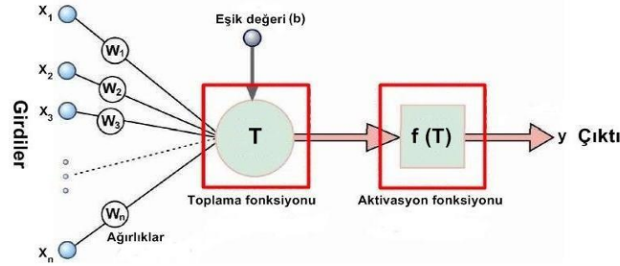
### 3.2.6. Çok Katmanlı Algılayıcı

ÇKA, Evrişimsel Sinir Ağları'na olan ilgiyi hızlı bir şekilde arttırarak yaygın bir kullanım alanına sahiptir. ÇKA'nın ortaya çıkışı XOR problemini çözmek amacıyla ortaya çıkmıştır. Aşağıda yer alan Şekil 5'te ÇKA modelinin giriş, ara ve çıkış katman yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5. ÇKA yapısı

ÇKA; girdi katmanı, gizli katman ve çıkış katmanı olmak üzere en az 3 katmandan oluşmaktadır. Girdi katmanı, çözülmesi istenilen probleme ilişkin bilgilerin ESA'ya tanıtılmasını sağlamaktadır. Çıktı katmanı ağ içerisinde işlenen bilginin dışarıya iletiildiği katmandır. Eğitimde kullanılan hataları geriye doğru azaltmaya çalışan ve öğrenen hata yayma modelini ortaya koymaktadır. Öğrenme algoritmaları içinde en çok geriye yayılım algoritması tercih edilmektedir. ÇKA ağları danışmalı öğrenme stratejileri kapsamında eğitim sırasında hem girdiler hem de girdilere karşılık ağız üretmesi gereken çıktılar ağız tanıtılmaktadır. Girdi-gizli, gizli-çıkış katmanı ve ağırlıklar ilk önce rastgele seçilmektedir. Giriş sinyalleri, ileri yönde katmandan katmana yayılmaktadır. Eğitim sırasında ağız ürettiği çıktılar ile beklenen çıktılar arasındaki fark ağız ağırlıklarına dağıtılmakta ve zaman içinde bu farkın en aza indirgenmesi amaçlanmaktadır. Çıktının, istenen nöron cevabından farklı olması durumunda hatalar ileri besleme aktarım işlevinin türeviyle aynı bağlantılar aracılığı ile geriye doğru yayılmakta ve ağırlıklarla değiştirilmektedir. Bilgi akışı, ileri beslemeli modellerde olduğu gibi ileri yönde sağlanırken geri beslemeli ağlarda öğrenme işlemi çift yönlü hafıza işleme sürecine dayanmaktadır [18].



Şekil 6. Aktivasyon fonksiyonu [18].

Yukarıda Şekil 6'da yer alan modelde aktivasyon fonksiyonu olarak herhangi bir matematiksel fonksiyon kullanılabilir. Temel olarak giriş değerleri,  $w$  ağırlıkları temsil eder ve ağız çıkışına aktarılan değere aktivasyon işlemi uygulanmış olur.

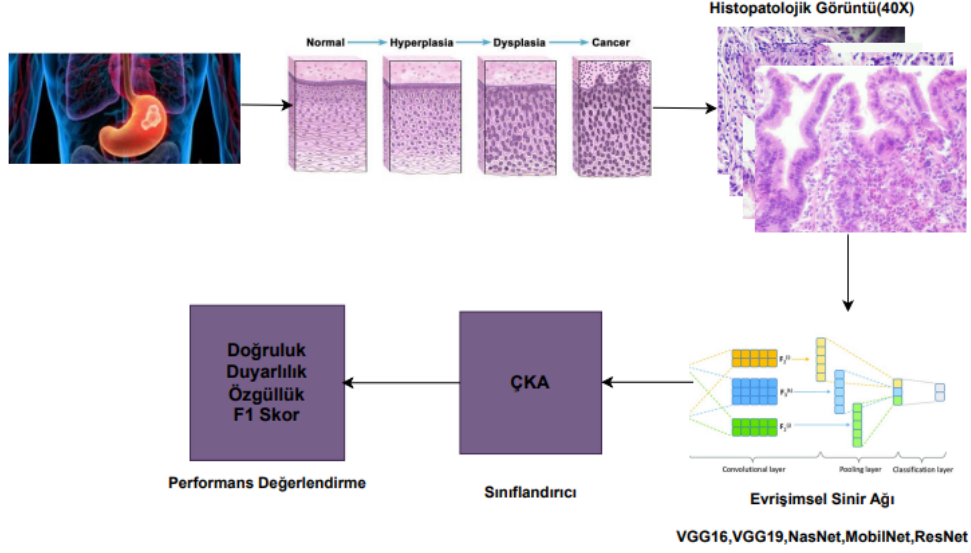
#### 4. Uygulama

Bu bölümde kullanılan veri özellikleri, uygulamada kullanılan yöntem, ölçüm değerleri ve performans değerlendirme metriklerinden bahsedilmektedir. Son aşamada çalışmanın uygulama sonuçlarına yer verilmiştir.

##### 4.1. Uygulama Çalışmaları

Görüntüler, 40X büyütülmüş histopatolojik dokular üzerinde işlemler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, 492 sağlıklı ve 501 hastadan alınan toplam 993 histopatolojik görüntüler üzerinden, veri iki etiket sınıfına ayrılmıştır. Modelin eğitimi için Python programlama dili kullanıldı. Modeli tanımlamak ve eğitmek için keras ve numpy derin öğrenme kütüphanelerinden faydalanıldı. Eğitim tur sayısı (epoch) deneysel çalışmalar sonucunda 43,45 ve 46 olarak belirlenerek model eğitimleri yapıldı. ÇKA sınıflandırıcısı için 46 epoch kullanıldı. Epoch sayısı arttıkça modelin başarımının da arttığı görüldü. Aktivasyon değeri için Rectified Linear Unit (ReLU) fonksiyonu kullanıldı. Görüntü boyutu  $244 \times 224 \times 3$  olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Görüntüler, numpy matrisi içerisine alınmıştır, 0 veya 1 olarak etiketleme işlemi yapılmıştır. Sınıflandırma aşamasında kullanılan ESA mimarileri,

matrisde yer alan pixel değerleri üzerinde işlemlerini yürütmektedir. Çalışma için toplamda 993 displazi görüntüsünün, %30 test ve %70 eğitim için kullanılmıştır. Bu çalışma için gerçekleştirilen yöntem yapılandırılmasına Şekil 7’de yer verilmiştir.



Şekil 7. Derin öğrenme yöntemleri ile mide displazilerinin histopatolojik görüntü üzerinden tespiti için akış diyagramı

Derin öğrenme modellerinin iyi performans göstermesi ve eğitilmesi için büyük veri setleri gereklidir. Bununla birlikte, biyomedikal alanındaki en büyük zorluklardan biri, uzman tarafından etiketlenmiş klinik veri eksikliğidir. Küçük veri kümeleri kullanarak derin öğrenme modellerini eğitmek için, büyük bir veri kümesinde geliştirilen ağırlığın mevcut modele aktarılması yakın zamanda uygulanan yaygın bir tekniktir. Bir ESA, verileri analiz etmek için denetimli öğrenme birimi algoritması olan algılayıcıları kullanan özellikli bir yapay sinir ağı türüdür.

#### 4.2. Performans Metrikleri

Makine öğrenmesi, derin öğrenme vb. algoritmaları değerlendirip tahmin sonuçları çıkartabilmek adına farklı performans metrikleri kullanılır. Modelin etkinliğini değerlendirmek ve karşılaştırmak için kullanılan kritik araçlardır. Bu metrikler sayesinde model performansı için ön görülebilir bir değerlendirme yapmamıza olanak sağlar. Karmaşıklık matrisi, sınıflandırma modellerinin performansını değerlendirmek için kullanılan bir tablodur. Gerçek ve tahmin edilen sınıfların dört farklı durumunu içerir: doğru pozitif, doğru negatif, yanlış pozitif ve yanlış negatif. Bu matris, modelin doğru ve yanlış tahminlerini göstererek hataları analiz etmeyi sağlar [19].

		Gerçek Sınıf Değeri	
		Pozitif	Negatif
Tahmin Değeri	Pozitif	TP	FP
	Negatif	FN	TN

Şekil 8. Karışıklık matrisi ve performans değerlendirme metrikleri

Karmaşıklık matrisinde gerçek sınıf değeri ile tahmin değerlerinin performans ölçütü hesaplamaları yapılmıştır. Karmaşıklık matrisi Şekil 8'deki gibi verilmiştir. Kullanılan performans metriklerine ait ifadeler eşitlik (1) – (3) ile ulaşılabilir:

- TP (True Positive – Doğru Pozitif): Gerçekte doğruyken doğru olarak tahmin edilmesi
- FN (False Negative – Yanlış Negatif): Gerçekte doğruyken yanlış olarak tahmin edilmesi
- FP (False Positive – Yanlış Pozitif): Gerçekte yanlışken doğru olarak tahmin edilmesi
- TN (True Negative – Doğru Negatif): Gerçekte yanlışken yanlış olarak tahmin edilmesi

$$\text{Doğruluk (Accuracy): } (TN + TP) / \text{TOPLAM} \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık / Doğru Pozitif Oranı (True Positive Rate – Sensivity): } TP / (TP+FP) \quad (2)$$

$$\text{Seçicilik / Özgüllük (True Negative Rate – Specifity): } TN / (TN+FP) \quad (3)$$

### 4.3. Uygulama Sonuçları

Bu çalışmada, Mide displazi ayırt etmek için hibrit bir ESA-Sınıflandırıcı modeli önerilmiştir. Yöntem, önceden eğitilmiş ESA modellerinden görüntülerin sağlam hiyerarşik özelliklerini elde etmeye ve bunları makine öğrenmesi algoritması aracılığıyla sınıflandırmaya dayanmaktadır. Bu modelde ESA, girdi verilerinden öznelik çıkarımı gerçekleştirirken, sınıflandırıcı ayıklanan öznelikleri sınıflandırır. Önceden eğitilmiş ESA modellerinin son havuzlama katmanından sonra softmax katmanı yerine DVM, KNN ve ÇKA kullanıldı. Önerilen model, önceden eğitilmiş ESA modellerine kıyasla daha iyi performans göstermektedir. Tablo 1'de ÇKA sınıflandırıcısından elde edilen sınıflandırma performans sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 1 analiz edildiğinde, MobileNet ile çıkarılan özelliklerin ÇKA kullanılarak daha yüksek doğrulukla sınıflandırdığı görülmektedir. Kullanılan 5 ESA model ile elde edilen özellikler ÇKA sınıflandırıcısı ile sınıflandırıldığında en yüksek doğruluk, hassasiyet ve özgüllük ve f1 değerine ÇKA sınıflandırıcısı ile MobileNet modeli ( %91,95 Doğruluk(Acc), %91,01 Duyarlılık(Sen), %92,72 Özgüllük(Spe), %91,01 F1 Skor) ulaşmıştır. Şekil 8'de MobileNet - ÇKA kullanarak elde edilen sonuçlara ait karmaşıklık matrisini göstermektedir.

Gerçek Sınıf Değeri	Normal	40.70 %	4.02 %
	Displazi	4.02 %	51.26 %
		Normal	Displazi
		Tahmin Değeri	

Şekil 9. ÇKA sınıflandırıcısı ile sınıflandırılmış MobileNet modelinin karmaşıklık matrisi

Şekil 9'da modelin görüntüler üzerinde gerçekleştirmiş olduğu tahminler değerleri ve gerçek sınıf değeri yüzdeleri yer almaktadır. Tablo 1'de en yüksek sınıflandırıcı ve model sonuçlarına yer verilmiştir.

Tablo 1. ÇKA sınıflandırıcısından elde edilen sonuçlar

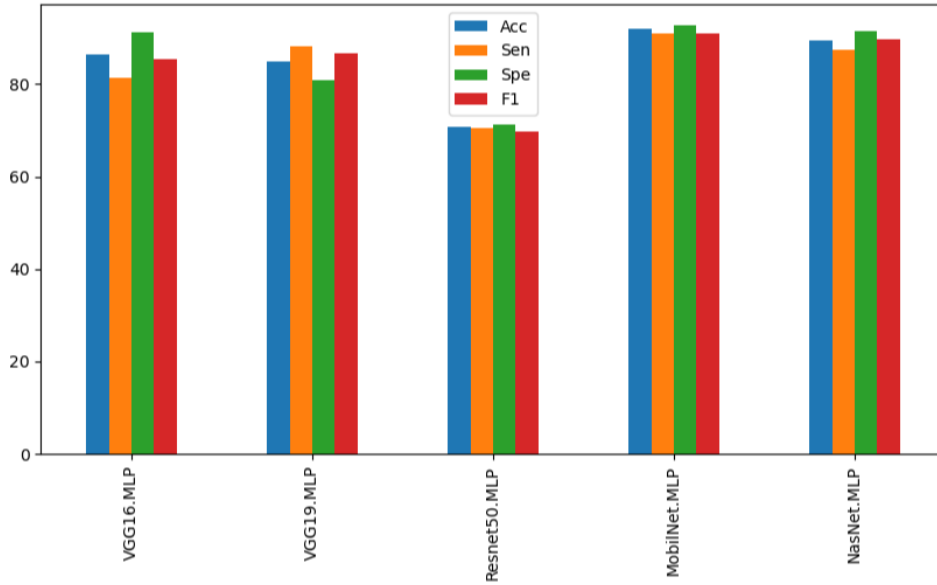
Sınıflandırıcı	Model	Doğruluk(%)	Duyarlılık(%)	Özgüllük(%)	F1 Skor(%)
ÇKA	VGG16	86,43	81,44	91,17	85,40
	VGG19	84,92	88,18	80,89	86,60
	ResNet50	70,85	70,52	71,15	69,79
	MobileNet	91,95	91,01	92,72	91,01
	NasNet	89,44	87,50	91,57	89,65

Tablo 2’de KNN ve DVM sınıflandırıcılarının en yüksek performans gösteren MobileNet ve NasNet modellerinin sonuçlarına yer verilmiştir.

**Tablo 2.** KNN ve DVM sınıflandırıcısından elde edilen sonuçlar

Sınıflandırıcı	Model	Doğruluk(%)	Duyarlılık(%)	Özgüllük(%)	F1 Skor(%)
KNN	MobileNet	84,42	83,50	85,29	83,93
DVM	NasNet	89,44	91,01	88,18	88,52

Şekil 10’da, ÇKA sınıflandırıcısı ile sınıflandırılmış VGG16, VGG19, MobileNet, NasNet, ResNet50 modellerinin doğruluk, duyarlılık, özgüllük ve F1 sonuç grafiği aşağıda verilmiştir.



**Şekil 10.** Doğruluk, Duyarlılık, Özgüllük, F1 skor metriklerine ait sınıflandırma sonuç grafiği

## 5. Sonuç

Bu çalışmada, mide displazisi tanısı için histopatolojik görüntüler üzerinde çalışılmış, ESA yardımıyla hastalığın tespiti amaçlanmıştır. Mide kanseri diğer kanser türlerine oranla görülme sıklığı olarak ilk sıralarda yer alıp, tespit edilme açısından da oldukça zorluk çekilen bir kanser türü olarak bilinmektedir. Zorluk çekilmesinin nedenlerinden biri belirtilerin başka hastalıklarla karıştırılmasıdır. Bu durum da hastalığın erken evrede tespitini zorlaştırmaktadır. Bu yüzden mide displazinin tanı ve tedavisi için erken dönemde teşhis büyük derece önem taşımaktadır. Bu çalışmada mide displazisinin tespiti için derin öğrenme ve ESA teknikleri kullanılarak hastalığın erken evrede tespiti amaçlanmaktadır.

Yapılan analizlerde kullanılan veri görüntüleri üzerinde en başarılı derin öğrenme modeli MobileNet ile birlikte eğitilen ÇKA sınıflandırıcısından ( %91,95 Doğruluk (Accuracy), %91,01 Duyarlılık (Sensitivity), %92,72 Özgüllük (Specifity), %91,01 F<sub>1</sub> Skor) elde edilmiştir. Derin öğrenme yöntemleri sayesinde erken dönemde mide displazisi tanısı konulabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışma klinik ortamda hekime yardımcı olacak ve ileriki çalışmalara ışık tutacaktır.

Çalışma veri sayısı açısından büyük klinik veriler ile çalıştırılmıştır. Ancak modelin doğruluğunu yükseltebilmek için daha çok veriyle daha iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir. Önerilen ESA modeli ile eğitimler tekrar gerçekleştirilebilir. Bu doğrultuda elde edilen deneysel sonuçlar, mevcut çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir.

### Kaynaklar

- [1] Buran, T., & Şahin, M. (2020). Mide Kanseri'nde Erken Tanı Hayat Kurtarır. *Celal Bayar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(4), 567-570.
- [2] Alacalı, M. (2012). Mide kanseri, mide kanseri taramaları ve mide kanserinden korunma. *Ankara Medical Journal*, 12(4), 195-198. Haupt RL, Haupt SE. *Practical Genetic Algorithms*. 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2004.
- [3] Sarı, R. Mide Kanseri Tanı ve Tedavi Planlamasında Görüntüleme Yöntemlerinin Yeri, *Gastrointestinal Sistem Kanserlerinin Cerrahisi*, (2020), 67-68.
- [4] Ikenoyama Y, Hirasawa T, Ishioka M, Namikawa K, Yoshimizu S, Horiuchi Y, & Tada T. (2021). Detecting early gastric cancer: Comparison between the diagnostic ability of convolutional neural networks and endoscopists. *Digestive Endoscopy*, 33(1), 141-150.
- [5] Hirasawa T, Aoyama K, Tanimoto T, Ishihara S, Shichijo S, Ozawa T, & Tada T. (2018). Application of artificial intelligence using a convolutional neural network for detecting gastric cancer in endoscopic images. *Gastric Cancer*, 21(4), 653-660.
- [6] Sakai Y, Takemoto S, Hori K, Nishimura M, Ikematsu H, Yano T, & Yokota H. (2018, Temmuz). Aktarıcı bir evrişimsel sinir ağı kullanarak endoskopik görüntülerde erken mide kanserinin otomatik tespiti. 2018 yılında 40. Yıllık Uluslararası IEEE Mühendislik ve Tıp ve Biyoloji Topuluğu Konferansı (EMBC) (s. 4138-4141). IEEE.
- [7] Pang X, Zhao Z, & Weng Y. (2021). The role and impact of deep learning methods in computer-aided diagnosis using gastrointestinal endoscopy. *Diagnostics*, 11(4), 694.
- [8] Li, L, Chen Y, Shen Z, Zhang X, Sang J, Ding Y, & Yu C. (2020). Convolutional neural network for the diagnosis of early gastric cancer based on magnifying narrow band imaging. *Gastric Cancer*, 23(1), 126-132.
- [9] Shibata, T, Teramoto A, Yamada H, Ohmiya N., Saito K., & Fujita, H. (2020). Automated detection and segmentation of early gastric cancer from endoscopic images using mask R-CNN. *Applied Sciences*, 10(11), 3842
- [10] Zhang, X., Hu, W., Chen, F., Liu, J., Yang, Y., Wang, L., ... & Si, J. (2017). Gastric precancerous diseases classification using CNN with a concise model. *PloS one*, 12(9), e0185508.
- [11] Shi, Z, Zhu, C, Zhang, Y. et al. Deep learning for automatic diagnosis of gastric dysplasia using whole-slide histopathology images in endoscopic specimens. *Gastric Cancer* 25, 751–760 (2022).
- [12] Das S. «medium,» 2017. Available: [medium.com/analytics-vidhya/cnns-architectures-lenet-alexnet-vgg-googlenet-resnet-and-more-666091488df5](https://medium.com/analytics-vidhya/cnns-architectures-lenet-alexnet-vgg-googlenet-resnet-and-more-666091488df5).
- [13] <https://medium.com/analytics-vidhya/cnns-architectures-lenet-alexnet-vgg-googlenet-resnet-and-more-666091488df5>, Erişim Tarihi : 2023, Konu: CNN Architectures
- [14] Yan, Z, Liu, H, Li, T, Li, J, & Wang, Y. (2022). Two dimensional correlation spectroscopy combined with ResNet: Efficient method to identify bolete species compared to traditional machine learning. *LWT*, 162, 113490
- [15] <https://medium.com/@godeep48/an-overview-on-mobilenet-an-efficient-mobile-vision-cnn-f301141db94d>. Erişim Tarihi:2023.
- [16] Wang W, Li Y, Zou T, Wang X, You J, Luo Y. "Dense-MobileNet Modelleri Üzerinden Yeni Bir Görüntü Sınıflandırma Yaklaşımı", *Mobil Bilgi Sistemleri*, cilt. 2020, Makale Kimliği 7602384, 8 sayfa, 2020
- [17] Şafak, E, and Barışçı, N. (2022). Hafif Evrişimsel Sinir Ağları Kullanılarak Sahte Yüz Görüntülerinin Tespiti. *El-Cezeri*, 9(4), 1282-1289.
- [18] Metin, N, Karadağ, K, and Terzioğlu, M. K. (2020). MLP/RBF Ağ Mimarileriyle Hibrit MGARCH-ANN Model Performans Karşılaştırması: Petrol Fiyat Oynaklığı. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 78-93.
- [19] Durmuş, M, Ergen, B, Çelebi, A, and Türkoğlu, M. (2023). Panoramik Diş Görüntülerinde Derin Evrişimsel Sinir Ağına Dayalı Gömülü Diş Tespiti ve Segmentasyonu. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 713-724.



## Evaluation of Academic Self-Efficiency, Community Feeling, and Academic Achievement of Students in the Process of the Covid-19 Pandemic by Data Mining Techniques

Songül KARABATAK<sup>1\*</sup>, Özal YILDIRIM<sup>2</sup>, Murat KARABATAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eğitim Yönetimi, Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2,3</sup>Yazılım Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup>skarabatak@firat.edu.tr, <sup>2</sup>oyildirim@munzur.edu.tr, <sup>3</sup>mkarabatak@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/07/2023;

Kabul/Accepted:19/03/2024)

**Abstract:** Thanks to the advancement of technology, vast amounts of data are being generated in various fields on a daily basis. The research on identifying hidden patterns and extracting useful information from big data has become increasingly important. In the field of education, the availability of large datasets has allowed for the emergence of data mining techniques as an alternative to traditional statistical methods. Unlike traditional statistical methods, data mining can uncover hidden relationships between variables, thus avoiding the loss of valuable information and enabling the utilization of essential data in education. By unlocking valuable insights and predicting important relationships, educational data mining (EDM) has the potential to enhance and improve the quality of education. This study aims to demonstrate the predictive power of EDM through a sample application and draw attention to its implications. The dataset used in this study consists of survey responses collected from university students. The variables in the dataset include academic self-efficacy, sense of community, academic achievement averages, and various demographic variables of distance education students. Descriptive modeling was employed to identify latent patterns between variables, while a predictive model was utilized to estimate variables. In order to achieve this, both association rule mining and classification algorithms were employed. The findings of this study indicate that EDM can effectively identify relationships between variables and make accurate predictions.

**Key words:** Educational data mining, academic self-efficiency, community feeling, academic achievement.

### Covid-19 Pandemisi Sürecinde Öğrencilerin Akademik Öz Yeterlilik, Topluluk Hissi ve Akademik Başarılarının Veri Madenciliği Teknikleri ile Değerlendirilmesi

**Öz:** Günlük hayatın bir parçası haline gelen teknolojiler sayesinde hemen her alanda devasa veri yığınları oluşmaktadır. Büyük verideki gizli örüntülerin tespit edilmesi ve faydalı bilgilerin keşfedilmesine yönelik araştırmalar önem kazanmıştır. Eğitim alanında biriken veri miktarı, bu alanda geleneksel istatistiksel yöntemlere alternatif olarak veri madenciliği tekniklerinin ön plana çıkmasını sağlamıştır. Geleneksel istatistiksel yöntemlerde bazı değişkenler arasındaki gizli ilişkiler göz ardı edilebilmektedir. Bu da bazı bilgilerin kaybolmasına ya da eğitim gibi temel alanlarda gerekli verilerin kullanılmamasına neden olabiliyor. Ancak eğitimsel veri madenciliği (EVM), eğitimin kalitesini iyileştirmek ve geliştirmek için değerli verilerin kilidini açabilir ve önemli ilişkileri tahmin edebilir. Bu nedenle bu çalışma, EVM'nin tahmin gücüne dikkat çekmek için örnek bir EVM uygulaması gerçekleştirmeyi amaçlamıştır. Veri seti üniversite öğrencilerinden toplanan görüşlerden oluşmaktadır. Bu veri setinin değişkenlerini uzaktan eğitim öğrencilerinin akademik öz yeterlilikleri, topluluk hissi, akademik başarı ortalamaları ve bazı demografik değişkenler oluşturmuştur. Betimsel model, çalışmadaki değişkenler arasındaki örtük örüntüleri ortaya çıkarmış ve değişkenleri tahmin etmek için yordayıcı bir model kullanılmıştır. Bunun için birliktelik kuralı yöntemi ve sınıflandırma algoritması da kullanılmıştır. Çalışma sonunda EVM'nin değişkenler arasındaki ilişkileri etkili bir şekilde bulabildiği ve değişkenleri tahmin edebildiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Eğitsel veri madenciliği, akademik öz yeterlilik, topluluk hissi, akademik başarı.

#### 1. Introduction

The products of extensive efforts to extract valuable information from data have started to surface. These studies, coupled with advancements in software technologies, have led to the development of numerous methods. These methods have diverged from traditional statistical approaches in certain aspects [1]. Among these innovative methods is data mining, which has gained popularity as a data analysis technique in recent times.

Data mining is the process of extracting implicit, meaningful, and valuable information from large datasets [2,3]. Similarly, data mining is defined as the task of obtaining 'valuable' information from large-scale data. This method enables the revelation of relationships between the data and facilitates future predictions when necessary

\* Sorumlu yazar: skarabatak@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-1303-2429, <sup>2</sup> 0000-0001-5375-3012, <sup>3</sup> 0000-0002-6719-7421

[4]. Data mining is used to uncover data patterns, organize data regarding hidden relationships, construct association rules, estimate values of unknown items to classify objects, create clusters of homogeneous objects, and uncover various types of findings that cannot be quickly produced by a classical computer-based information system [5,6].

Mathematicians conducted the first studies on data mining in logic and computer science in the 1950s. These studies later transitioned to artificial intelligence and machine learning technologies and found applications in various fields such as commerce, tourism, medicine, insurance, communication, production, biology, bioinformatics, and social sciences [7,8]. Fundamentally, data mining models can be categorized into two types [5]: descriptive and predictive models. Descriptive models reveal patterns, relationships, or correlations within the data [9]. Descriptive models often utilize unsupervised learning techniques to generate designs that capture the underlying structure and relationships within the data [10]. Descriptive data mining methods uncover the general characteristics of the dataset [11]. In descriptive models, existing data patterns that can guide decision-making are defined. The analysis results provide an opportunity to understand the relationships present in the dataset without any prior hypothesis [12].

Predictive models, on the other hand, create one or more datasets, make inferences from the existing dataset, and attempt to predict the behavior of new datasets [9]. Predictive models often employ supervised learning techniques to predict unknown or future values of dependent variables based on the properties of relevant independent variables [13]. Predictive models play a crucial role in decision-making processes. They aim to develop a model based on data with known outcomes and use this model to estimate the outcomes for datasets with unknown results [12].

The development of data mining also enables the processing of training data [14]. Data mining methods are also utilized to discover unique types of data originating from educational environments and gain a better understanding of individuals' learning or skills [15]. Descriptive and predictive models of data mining are also employed to analyze training data. Educational data mining (EDM) can be defined as the application of data mining methods to training data [16]. In other words, EDM can be considered as a data mining method that focuses on educational content [17].

EDM's primary objective is to utilize large-scale educational datasets to gain a deeper understanding of learning and provide valuable insights into the learning process [18]. Therefore, EDM relies on data mining to explore data from educational settings and uncover descriptive patterns and predictions that characterize learners' behaviors and achievements, domain knowledge content, assessments, educational functionalities, and applications [5]. EDM encompasses a set of processes that extract meaningful information from extensive and rich educational datasets using methods such as prediction and classification [19].

The utilization of EDM has experienced a substantial increase due to its focus on developing strategies for analyzing the unique types of data found in an academic context. By doing so, EDM offers new avenues for addressing long-standing research problems in traditional educational technology. Consequently, it emerges as a valuable resource for predicting and enhancing the quality of education [20]. Given the challenges associated with analyzing current learning behaviors using traditional research methods, EDM stands as one of the most practical applications for predicting learner performance [21]. The proliferation of e-learning systems has led to an increase in the use of diverse assessment methods. EDM has the potential to fulfill this growing need and further expand educational possibilities [22]. Moreover, the student-centered nature of education and the demand for personalized instruction underscore the importance of utilizing data mining techniques on educational data [5]. By employing EDM methods, it becomes feasible to analyze student behaviors effectively, which would otherwise remain elusive using traditional research methods [21].

EDM-based assessments are widely recognized for their numerous advantages over traditional assessment methods [22]. When appropriately designed, these assessment models allow for evaluation during the learning process, instant intervention, minimizing time loss, and easy repetition of assessments conducted with traditional tools. By leveraging the ongoing interaction between students and online systems, these models can replicate assessments without the need for time-consuming paper tests. Furthermore, EDM serves as a valuable resource for predicting and improving the quality of education. It unveils student achievements and provides various suggestions for enhancing success [23]. Some researchers argue that the challenges faced in higher education result from a knowledge gap caused by insufficient training processes such as planning, evaluation, and consultancy. They propose using data mining-based models to address these issues [24]. By leveraging data mining, the hidden patterns, relationships, and anomalies can be uncovered, thus bridging the knowledge gap [25]. Additionally, EDM enables the interpretation of students' perspectives [5].

EDM can extract meaningful and valuable insights from various data sources within educational systems, including gender, age, motivation, emotional states, exam grades, and attitudes [18, 26, 27]. The literature highlights several advantages of EDM, including fast and meaningful results, easy applicability, and more efficient

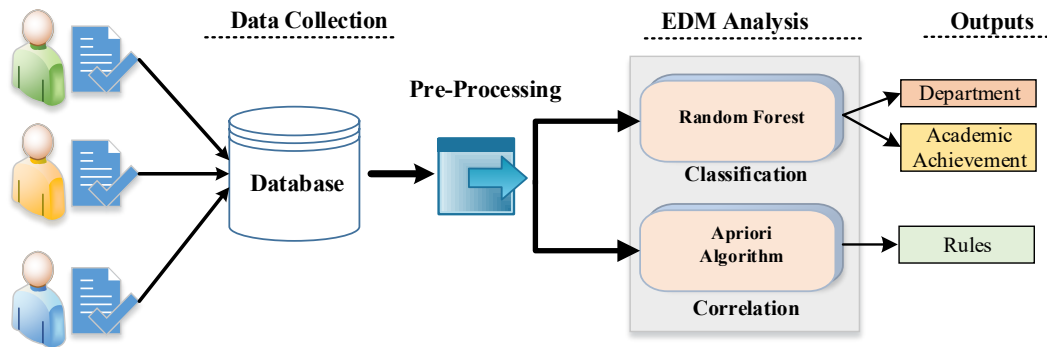
identification of individual differences compared to traditional methods [28]. Furthermore, data mining can generate meaningful and valuable information from online and distance education data.

Digital platforms such as online and distance education environments, which were popular prior to the pandemic, have now become the prevailing norm within the education system as a result of the pandemic and the need for learning management systems (LMS). As learners engage with these systems in various ways, they generate extensive data in the form of electronic traces. This wealth of data has been recognized as a valuable resource for understanding the learning process and outcomes [29]. Consequently, the data stored within LMS has gained significant value, but it needs to be effectively analyzed. In other words, while the collection of data from LMS learners has become easier, the analysis of digital educational information has become more complex [21]. Consequently, there is a high demand for research based on educational data mining (EDM) [29], as online systems store data that can be analyzed to address numerous issues [30].

EDM is also utilized to assess students' performance based on different needs and cognitive characteristics, as well as to understand their learning styles [3, 27, 31]. This capacity has the potential to significantly guide the use of student data accumulated within LMS, enhancing the effectiveness of distance education processes and facilitating personalized instruction. Rodrigues et al. [32] also emphasized in their study that EDM methods should be employed to enhance the teaching and learning process for students. Therefore, the objective of this study is to conduct a sample EDM application to highlight its predictive capabilities. The dataset for this application consists of the opinions of university students who participated in distance education during the COVID-19 pandemic. It was hypothesized that the pandemic would impact students' academic self-efficacy, sense of community, and academic achievements. Based on this assumption, this study aims to uncover and predict the hidden, significant, and meaningful relationships between demographic characteristics (age, gender, and department), academic achievements, academic self-efficacy, and community feelings of students engaged in distance education through the utilization of data mining methods.

## 2. Method and Material

In this study, a relational survey model was employed. The relational survey model elucidates the rationale for enhanced modeling by examining the potential correlation between two or more variables [33,34]. Additionally, predictive and descriptive data mining techniques were utilized to unveil latent patterns. Figure 1 illustrates the schematic diagram of the methodology employed in the study.



**Figure 1.** A schematic diagram illustrating the methodologies employed in the analysis

### 2.1. Education Data Set

The study was conducted during the spring semester of the 2019-2020 academic year. The research group consisted of 1898 students enrolled in the education faculty of a university located in a province in eastern Turkey. The survey was distributed electronically to the entire group via the distance education system. A total of 467 students from this population completed the form. However, 84 forms with missing data were excluded from the dataset. The final dataset included 383 student responses. Of these participants, 231 were female and 152 were male. The age range of participants was between 19 and 41. Some students (n=80) reported using the internet for a short duration (0-3 hours), while others (n=190) used it moderately (3-7 hours), and some (n=113) used it extensively (more than 7 hours). In terms of accessing course documents, 89 students reported experiencing

difficulties, while the majority (n=294) stated that they did not encounter any issues. The distribution of students across departments who participated in the study is shown in Figure 2.

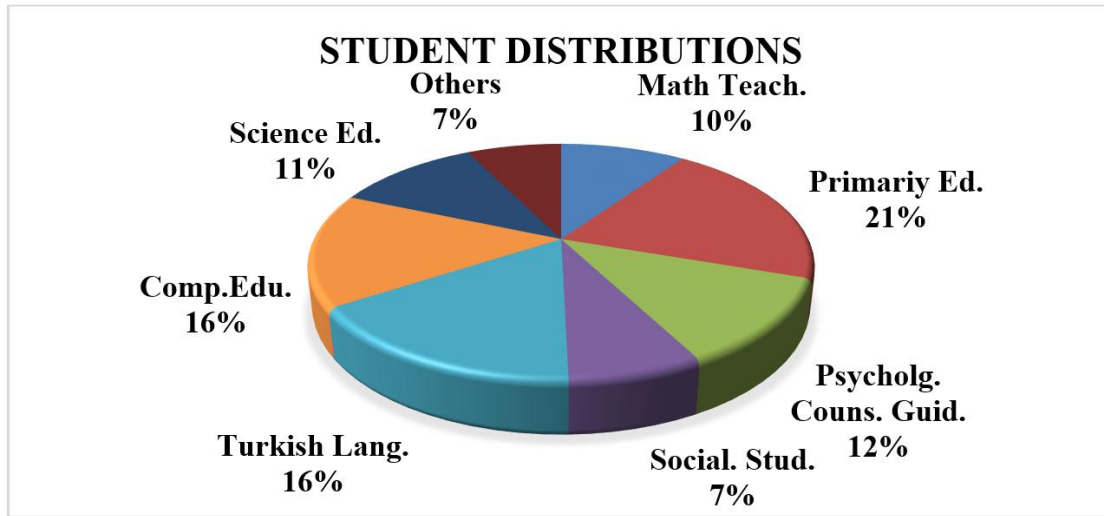


Figure 2. The department distribution rates of the students

As depicted in Figure 2, students are enrolled in eight distinct departments: Mathematics Teaching (n=37), Primary Education (n=79), Psychological Counseling and Guidance (n=46), Social Studies Teaching (n=28), Turkish Language Teaching (n=62), Computer Education Teaching (n=60), Science Teaching (n=43), and other departments (n=28).

## 2.2. Data Collection Tools

The data collection tool used consists of two parts. First, the student's demographic characteristics (gender, department, and age) and internet usage status (daily internet usage duration and difficulty in accessing the course documents). The second part included academic achievement (GPA of the previous distance education term), Academic Self-Efficacy Scale, and Community Feelings Scale.

The *Academic Self-Efficacy Scale* was developed in 1981 by Jerusalem and Schwarzer [35] and adapted into Turkish by Yılmaz, Gürçay, and Ekici [36]. The scale consists of seven items. The Cronbach's alpha reliability value of the original scale was .87. The Adapted Turkish scale Cronbach Alpha reliability value was determined as .79. In the present study, the reliability coefficient was calculated as .86. The *Community Feelings Scale* was developed by Rovai et al. [37] and adapted into Turkish by Ilgaz and Askar [38]. The reliability coefficient of the scale, Cronbach alpha coefficient, was found to be .80. In this study, the reliability value of the scale was calculated as .83. The items of the Academic Self-Efficacy Scale and the Community Feelings Scale are given in Appendix 1.

## 2.3. Data Pre-Processing Stage

One of the most critical steps in the data mining process is the pre-processing stage. The success of the pre-processing stage is vital in obtaining accurate and effective results. During the pre-processing stage, the data set was first filtered to eliminate noisy data (n=87). The data collected with the Academic Self-Efficacy Scale were categorized as Sufficient, Partially Sufficient, and Insufficient. The Community Feelings Scale data were grouped as *Low*, *Medium*, and *High*. The daily internet usage duration data were also grouped as *Little*, *Moderate*, and *Lot*. The difficulty accessing the course documents was categorized as Yes and No. All academic achievement averages were converted into a 4-point system.

## 2.4. The Proposed Data Mining Techniques

There are several methods and algorithms used in data mining for converting data into information. These methods include classification, clustering, predictive modeling, data visualization, change and deviation detection analysis, and association rules [39]. The choice of algorithm depends on the method used for data grouping. In this

study, the focus is on classification algorithms as an example of a predictive model, and association rules as an example of a descriptive model.

Classification is the process of appropriately assigning data to defined classes within a dataset. Classification algorithms, on the other hand, are used to learn the characteristics of different types using educational data and predict which category new information belongs to [40]. The most commonly used classification algorithms in the literature are Naive Bayes, Artificial Neural Networks (ANN), Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbor (IBK), KStar, C4.5 (J48), and Random Forest algorithms. In this study, all algorithms were tested in the classification process, and it was found that the Random Forest Algorithm produced the best results. Therefore, the results of the Random Forest algorithm are presented in this study. The Random Forest Algorithm is a tree-based classification algorithm that generates multiple classifiers and classifies new data based on the estimation results of these classifiers [41].

To evaluate the models created using classification algorithms and determine which classification model produces more accurate results, certain evaluation metrics are used. These metrics are based on a table known as the confusion matrix. Each row of the matrix represents the actual values, while each column represents the predicted values [42].

The Association Rule focuses on the frequency of collected data and the relationships between items. To make relationship inferences, association rules must meet specific metrics. These metrics include *support*, *confidence*, and *lift*. The *support value* indicates the number of occurrences of groups A and B together in the dataset. The *confidence value* is the frequency of finding group B in the relationships where group A is present in the dataset. The *lift value* represents the frequency of co-occurrence of groups A and B when they are independent [43]. In this study, the term "group" is specified as the *variable*.

Apriori, segmentation, sampling, AIS, SETM, DIC, and CHARM are algorithms used to discover relationships in association rules [23]. The Apriori algorithm is an improvement over the AIS and SETM algorithms. The Apriori algorithm was chosen in this study due to its ease of processing, speed, and accuracy compared to other algorithms. Figure 3 provides a representation of how the Apriori algorithm operates.

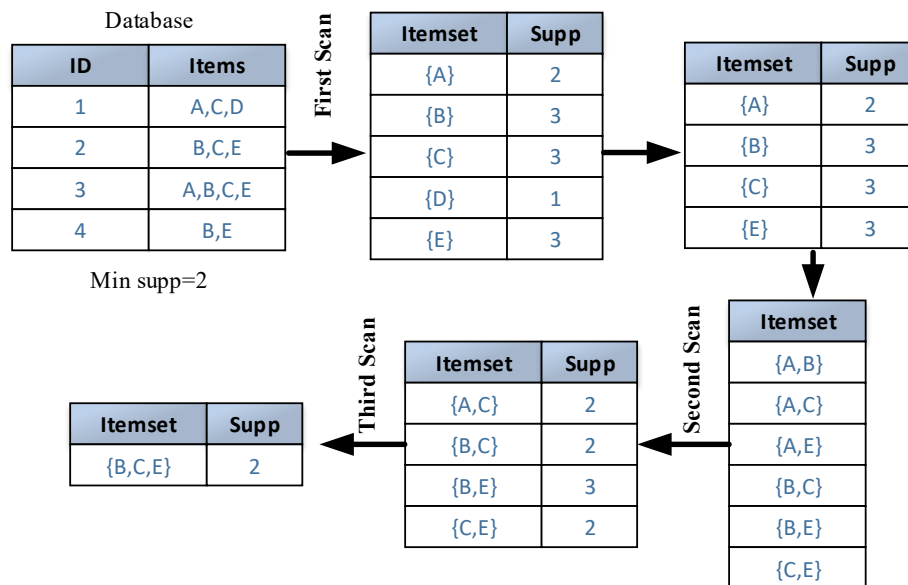


Figure 3. A representation of the operation of the Apriori algorithm

### 3. Experimental Results

The findings regarding the classification performed to determine the predictive accuracy of variables (department and academic achievement) and the association rule used to analyze the relationships between the variables are presented below.

### 3.1. Classification Results

Two models were used to predict the *department* variable. The first model estimated the department variable using only gender, age, and academic achievement variables. The confusion matrix, obtained by the Random Forest algorithm, is shown in Figure 4.

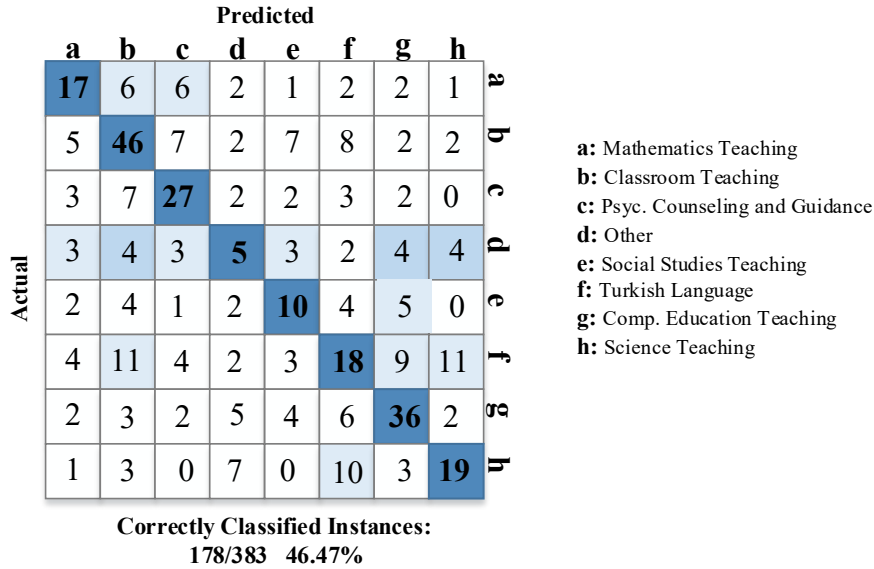


Figure 4. Classification findings related to the first model estimating the department

As seen in Figure 4, the number of Correctly Classified Instances was 178, and the accuracy value was 46.47% out of a total of 383 data points. Students study in eight different departments. Therefore, considering that an eight-variable classifier was used to estimate the department variable, it can be said that the obtained accuracy is an acceptable result.

In the second model, all variables (academic self-efficacy, community feeling, age, gender, and academic achievement) were used as input for the classifier, and the *department* variable was estimated. The Confusion Matrix and classification accuracy obtained are shown in Figure 5.

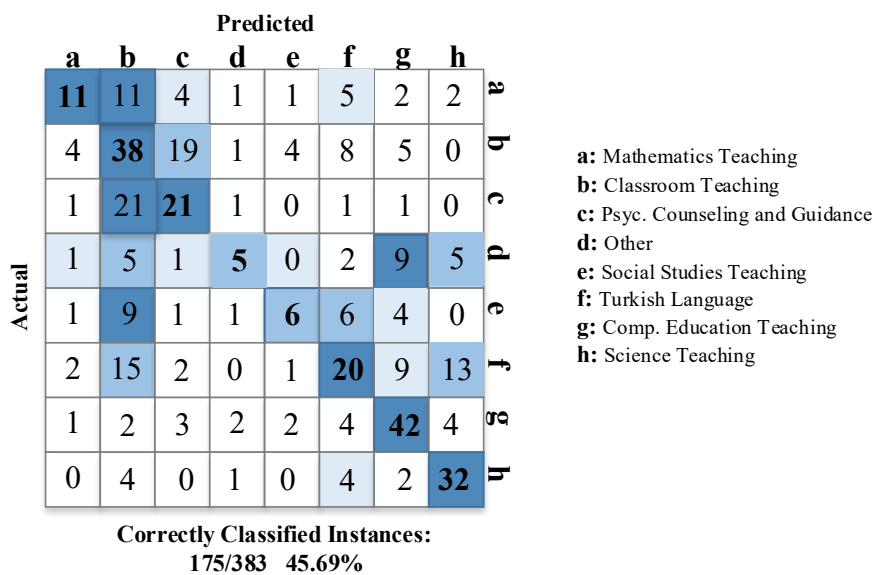


Figure 5. Classification findings related to the second model estimating the department

In Figure 5, the Correctly Classified Instances value is 175, and the accuracy value is 45.69%. This accuracy rate obtained for estimating the quotient variable is also acceptable. It can be concluded that all classification results are acceptable for predicting the department of students.

### 3.2. Regression Results

To predict the variable of *academic achievement*, we investigated the relationship between academic achievement, demographic data, academic self-efficacy, and community feeling data. The algorithm that yielded the best prediction results was once again Random Forest. Based on the results obtained from the algorithm, the correlation coefficient between academic achievement and the input variables was found to be .55 (Mean absolute error = .34; Root mean squared error = .46; Relative absolute error = 79.92%; Root relative squared error = 83.42%). It can be concluded that these results are acceptable for estimating academic achievement.

### 3.3. Association Rule Results

The meaningful patterns and rules emerging from the Apriori algorithm benefited from determining the relationships among distance education students' academic self-efficacy, community feelings, academic achievement, and demographic variables, as given in Table 1.

**Table 1.** Some meaningful patterns and rules emerge with the association rule.

Rules	Conf	Lift
1. ASE1= <i>Sufficient</i> ASE5= <i>Sufficient</i> ==> ASE4= <i>Sufficient</i>	100%	2.86
2. ASE3= <i>Sufficient</i> ASE4= <i>Sufficient</i> CF6= <i>Medium</i> ==> ASE2= <i>Sufficient</i>	100%	1.85
3. ASE3= <i>Sufficient</i> CF1= <i>High</i> CF3= <i>High</i> ==> CF4= <i>High</i>	97%	2.70
4. Gender= <i>Woman</i> ASE2= <i>Sufficient</i> ASE4= <i>Sufficient</i> ==>ASE3= <i>Sufficient</i>	96%	1.89
5. ASE6= <i>Insufficient</i> CF5= <i>Low</i> ==> ASE5= <i>Insufficient</i>	96%	1.81
6. Gender= <i>Woman</i> ASE4 ==> ASE3= <i>Sufficient</i>	93%	1.82
7. Difficulty= <i>No</i> ASE4= <i>Sufficient</i> ASE6= <i>Sufficient</i> ==> ASE1= <i>Sufficient</i>	93%	1.95
8. Gender= <i>Woman</i> Difficulty= <i>No</i> ASE4= <i>Sufficient</i> ==> ASE2= <i>Sufficient</i>	92%	1.70

ASE: academic self-efficacy; CF: community feeling; Conf: confidence value; Difficulty: source access difficulty

As seen in Table 1, the rules obtained by the association rule show that EDM can be used to extract hidden, meaningful, and valuable relationships between variables. This is because high-value rules, such as a confidence value of 100% and a lift value of 2.86, were obtained. For example, Rule 8 states that 92% of female students who consider themselves sufficient in the judgment ASE4, and do not have difficulty accessing resources, also consider themselves sufficient in the judgment ASE2. The lift value of Rule 8 (lift = 1.70) indicates the interestingness of this rule, as the lift value is a measure of the importance of a rule. The higher this value is compared to 1, the more valuable the result. This interpretation also applies to the other rules.

## 4. Conclusions and Suggestions

Traditional statistical methods can lead to the loss or underutilization of important information in critical areas such as education. As a result, alternative analysis methods like data mining have been developed as contemporary approaches to traditional statistical methods. Therefore, the aim of this study is to demonstrate the significance of Educational Data Mining (EDM) through practical application.

In this study, an exemplary application of EDM was conducted to examine the relationships between students' academic achievements, demographic characteristics (age, gender, and department), and social variables such as academic self-efficacy and sense of community. The Apriori algorithm, one of the association rule algorithms in data mining, was employed to analyze these relationships. Additionally, the Random Forest, a classification algorithm, was used to estimate the department and academic achievement variables.

The results of the analysis revealed that the association rule algorithm successfully exposed hidden, interesting, valuable, and meaningful relationships between variables, while the classification algorithms accurately predicted the variables. This outcome demonstrates that data mining methods and algorithms can elucidate and forecast the relationships between various attitudes and behaviors in fields such as educational sciences. In other words, data mining models are applicable to both predictive and descriptive academic research. According to Zaiane [44], data mining is the process by which precise and intriguing patterns can be automatically extracted from large datasets, providing insights into the learning process or student behavior. Injadat et al. [45]

also highlight the potential of data mining methods in analyzing training data. Similarly, in the study conducted by Tekin and Polat [46], the results of the association rule analysis supported the findings of traditional statistical analyses (t-test and ANOVA), and significant patterns that traditional statistical analyses failed to identify were discovered through association rule analysis. Another study [22] revealed that assessments conducted using EDM yielded more comprehensive information about students in higher education.

Data mining methods, in addition to traditional statistical analysis, can enhance research in numerous ways and provide more inferences about the participants [19, 31]. However, data mining can be a complex analysis method that may be challenging for today's educators and administrators to utilize. Therefore, policymakers should encourage the development of software that incorporates data mining, making it accessible for educators and school administrators. Additionally, students should be made aware of EDM. To achieve this, faculty members teaching Scientific Research Methods courses should incorporate both traditional statistical methods and contemporary methods like EDM. Furthermore, a separate course dedicated to EDM should be included in the curriculum at the master's or doctorate levels.

## References

- [1] Haberal I. Analysis of web log using data mining algorithms. MSc thesis, Baskent University, Ankara, Turkey, 2007.
- [2] Chen MS, Han J, Yu, PS. Data mining: an overview from a database perspective. *IEEE Trans. Knowl Data Eng* 1996; 8(6): 866-883.
- [3] Angeli C, Howard SK, Ma J, Yang J, Kirschner PA. Data mining in educational technology classroom research: Can it make a contribution?. *Comput Educ* 2017; 113: 226-242.
- [4] Ateş Y, Karabatak M. (2017). Multiple minimum support values for quantitative association rules. *Science and Engineering Journal of Firat University* 2017; 29(2): 57-65
- [5] Peña-Ayala A. (Ed.) *Educational Data Mining: Applications and Trends* (Vol. 524). Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [6] Pujari AK. *Data Mining Techniques*. Hyderabad: Universities Press (India) Private Limited, (2001).
- [7] Kaya H, Köymen K. Data mining concept and its application areas. *Firat University Journal of Middle Eastern Studies* 2008; 6(2): 159-164.
- [8] Thuraisingham B. A primer for understanding and applying data mining. *IT Professional* 2000; 2(1): 28-31.
- [9] Velickov S, Solomatine D. (2000). Predictive data mining: practical examples. In *2nd Joint Workshop on Applied AI in Civil Engineering*. 2000; 1: 1-17.
- [10] Peng Y, Kou G, Shi Y, Chen Z. (2008). A descriptive framework for the field of data mining and knowledge discovery. *International Journal of Information Technology & Decision Making* 2008; 7(4): 639-682.
- [11] Cemaloğlu N, Duykuluoğlu A. *Data Mining in Social Sciences*. Ankara: PegemA, 2020.
- [12] Sevindik T, Kayışlı K, Ünlükahraman O. Data mining in web-based education. *Turk J Comput Math Educ* 2012; 3(3): 183-193.
- [13] Hand DJ, Mannila H, Smyth P. *Principles of Data Mining*. Massachusetts: MIT Press, 2001.
- [14] Asif R, Merceron A, Ali SA, Haider NG. Analyzing undergraduate students' performance using educational data mining. *Comput Educ* 2017; 113: 177-194.
- [15] Chalaris M, Gritzalis S, Maragoudakis M, Sgouropoulou C, Tsolakidis A. Improving quality of educational processes providing new knowledge using data mining techniques. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 2014; 147: 390-397.
- [16] Romero C, Ventura S, Pechenizkiy M, Baker RS. (Eds.). *Handbook of Educational Data Mining*. USA: CRC Press, 2010.
- [17] Murugananthan V, ShivaKumar BL. An adaptive educational data mining technique for mining educational data models in e-learning systems. *Indian Journal of Science and Technology* 2016; 9(3): 1-5.
- [18] Romero C, Ventura S. (2010). Educational data mining: a review of the state of the art. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2010; 40(6): 601-618.
- [19] Berland M, Baker RS, Blikstein P. Educational data mining and learning analytics: Applications to constructionist research. *Technol, Knowl Learn* 2014; 19(1-2): 205-220.
- [20] Liu C, Zou D, Chen X, Xie H, Chan WH. A bibliometric review on latent topics and trends of the empirical MOOC literature (2008–2019). *Asia Pacific Education Review* 2021; 1-20.
- [21] Hung HC, Liu IF, Liang CT, Su YS. Applying educational data mining to explore students' learning patterns in the flipped learning approach for coding education. *Symmetry* 2020; 12(2): 213.
- [22] Baker RS, Corbett AT. Assessment of robust learning with educational data mining. *Research & Practice in Assessment* 2014; 9: 38-50.
- [23] Şengür D, Karabatak S. Data mining techniques based on students achievements analysis. *Turkish Journal of Science & Technology* 2018; 13(2): 53-59.
- [24] Göksu IB. Learners' evaluation based on data mining in a web-based learning environment. *Journal of Computer and Education Research* 2015; 3(5): 78-95.
- [25] Delavari N, Beikzadeh MR, Phon-Amnuaisuk S. Data mining application in higher learning institutions. *Informatics in Education* 2008; 7(1): 31-54.
- [26] Scheuer O, McLaren BM. Educational data mining. In *Encyclopedia of the Sciences of Learning* 2012; 1075-1079.
- [27] Bilici Z, Özdemir D. Data mining studies in education: Literature review for the years 2014-2020. *Journal of Bayburt Education Faculty* 2022; 17(33): 342-376.



- [28] Baker RS. Data mining for education. *International Encyclopedia of Education* 2010; 7(3): 112-118.
- [29] Charitopoulos A, Rangoussi M, Koulouriotis D. On the use of soft computing methods in educational data mining and learning analytics research: A review of years 2010–2018. *Int J Artif Intell Educ* 2020; 30(3): 371-430.
- [30] Mehta MH, Chauhan NC, Gokhale A. Predicting institute graduation rate with genetic algorithm assisted regression for education data mining. *ICTACT Journal on Soft Computing* 2021;11(2): 2266-2278.
- [31] Fernandes CM, Bouthillette F, Raboud JM, Bullock L, Moore CF, Christenson JM, ... Way M. Violence in the emergency department: a survey of health care workers. *Cmaj* 1999; 161(10): 1245-1248.
- [32] Rodrigues MW, Isotani S, Zarate LE. Educational Data Mining: A review of evaluation process in the e-learning. *Telematics and Informatics* 2018; 35(6): 1701-1717.
- [33] Büyükoztürk Ş, Kiliç-Çakmak E, Akgün ÖE, Karadeniz Ş, Demirel F. *Scientific Research Methods*. Ankara: PegemA, 2011.
- [34] Gliner JA, Morgan GA, Leech, NL. *Research Methods in Applied Settings: An Integrated Approach to Design and Analysis*. Routledge, (2016).
- [35] Jerusalem M, Schwarzer R. Fragebogen zur Erfassung von "Selbstwirksamkeit. Skalen zur Befindlichkeit und Persönlichkeit In R. Schwarzer (Hrsg.). (Forschungsbericht No. 5). Berlin: Freie Universitaet, Institut fuer Psychologie,1981.
- [36] Yılmaz M., Gurçay D., Ekici G. Adaptation of the Academic Self-Efficacy Scale to Turkish. *H. U. Journal of Education*, 2007; 33(33): 253-259.
- [37] Rovai AP, Wighting MJ, Lucking R. The Classroom and school community inventory: Development, refinement, and validation of a self-report measure for educational research. *The Internet and Higher Education* 2004; 7(4): 263-280.
- [38] Ilgaz H., Aşkar P. The Development of a Community Feeling Scale toward Online Distance Education Environments. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT) 2009: 1(1): 27-34*.
- [39] Arslan E. (2012). Data mining methods, Hyperlink: [<https://emraharslanbm.wordpress.com/2012/07/17/veri-madenciligi-yontemleri/>]. Retrieved on 02 August 2021.
- [40] Tanyıldızı E, Karabatak M, Yıldırım G, Özpolat Z. Performance analysis of classification algorithms in wart treatment. *Science and Engineering Journal of Firat University* 2018; 30(2): 249-256.
- [41] Akar Ö, Güngör O. Classification of multispectral images using Random Forest algorithm. *Journal of Geodesy and Geoinformation* 2013; 1(2): 139-146.
- [42] Alan A, Karabatak M. Evaluation of the factors affecting performance on the data set-classification relationship. *Science and Engineering Journal of Firat University* 2020; 32(2): 531-540
- [43] Uslu, M. Association rule. Hyperlink: [<https://www.slideshare.net/uslumetin/birliktelik-kurallar-kullanılarak-pazar-sepeti-analizi-market-basket-analysis-using-association-rules>], 2016. Retrieved on 05 December 2021.
- [44] Zaiane OR. Web usage mining for a better web-based learning environment. *Proceedings of the 4th IASTED International Conference on Advanced Technology for Education*, 2001. <https://era.library.ualberta.ca/items/0a182195-ce39-4b5d-a1c1-291ed91a0f36>
- [45] Injadat M, Moubayed A, Nassif AB, Shami A. Systematic ensemble model selection approach for educational data mining. *Knowledge-Based Syst*, 2020, 105992.
- [46] Tekin A, Polat E. Evaluation of teacher candidates' techno-pedagogical education competencies with the rule of association. In: Nabiyev, V, Erümit AK, editors. *Artificial Intelligence in Education From Theory to Practice*. Ankara: PegemA, 2020.

## APPENDIX -1

### Academic Self-Efficacy Scale

Code	Original Form	Adapted Form
ASE1	I am always in a position to accomplish the things that need to be done in my university education.	Üniversite öğrenimimde her zaman yapılması gereken işleri başarabilecek durumdayım
ASE2	I always achieve high success when I am adequately prepared for the exam	Yeterince hazırlandığım zaman sınavlarda daima yüksek başarı elde ederim
ASE3	I know very well what I need to do to get good grades	İyi not almak için ne yapmam gerektiğini çok iyi biliyorum
ASE4	Even if a written exam is very difficult, I know that I will pass it	Bir yazılı sınav çok zor olsa bile, onu başaracağımı biliyorum
ASE5	I cannot think of failing any exam	Başarısız olacağım herhangi bir sınav düşünmüyorum
ASE6	I have a relaxed attitude in exam environments because I trust my intelligence	Sınav ortamlarında rahat bir tavır sergilerim, çünkü zekama güveniyorum
ASE7	I usually do not know how to deal with the subjects I need to learn while preparing for exams	Sınavlara hazırlanırken öğrenmem gereken konularla nasıl başa çıkmam gerektiğini genellikle bilemem.(-)

### Community Feelings Scale

Code	Original Form	Adapted Form
CF1	I feel that students in this program care about each other	Bu programdaki öğrencilerin birbirlerini önemsediklerini hissedirim.
CF2	I trust others who take this course	Bu dersi alan diğer kişilere güvenirim.
CF3	I think this program meets my educational needs	Bu programın eğitim ihtiyaçlarımı karşıladığımı düşünüyorum.
CF4	I think this program gives me a lot of opportunities to learn	Bu programın öğrenmem için bana çokça fırsat verdiğini düşünüyorum.
CF5	I regularly talk to those in this program about my personal issues	Bu programdakilerle kişisel konularım hakkında düzenli olarak konuşurum.
CF6	I share educational values with others in this program	Bu programdaki diğer kişilerle eğitsel değerleri paylaşıyorum.

## Tek Katmanlı Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Yapısal Performansının İncelenmesi

Mehmet Sedat Hayalioğlu<sup>1</sup>, Mehmet Ali BEKTAŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye  
<sup>2</sup> Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Çetinkayalar Yapı Elemanları A.Ş., Diyarbakır, Türkiye  
<sup>1</sup> hsedat@dicle.edu.tr, <sup>2</sup> bektas1026@gmail.com

(Geliş/Received: 04/09/2023;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Öz:** Çelik kubbe sistemleri, geniş açıklıkları en az taşıyıcı eleman gereksinimi duyarak yapılan çatı örtü sistemleridir. Bu kubbe sistemlerinden biri olan tek katmanlı kubbe sistemleri, geometrik ve tasarımsal özelliklerinden dolayı farklı bir yapısal performans sergilemektedirler. Bu nedenle, gerilme dağılımını doğru bir şekilde anlamamız ve tasarımı buna göre yapmamız gerekmektedir. Bu makalede, tek katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı üzerine yapılan bir çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Eurocode-1 ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 esas alınarak yapıya etki eden yüklerin hesaplamaları ve AISC 360-10 yönetmeliğine uygun boyutlandırmalar gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kritik gerilme oluşan çubukların kesit kontrolleri Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğine göre kontrol edilmiştir. Bulgular, kubbe sisteminin çember kirişlerinin etek bölgelerinde en yüksek çekme, tepe bölgelerinde ise en yüksek basınç gerilmelerine sahip olduğunu ve asimetrik yük altında çubukların farklı gerilmelere maruz kalabileceğini göstermektedir. Ayrıca AISC 360-10 ile Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğinin birbirine çok yakın ve benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışma, tek katmanlı kubbe sistemleriyle ilgilenen mühendisler için önemli bir rehber niteliği taşımakta olup, yapı tasarımında kubbe geometrisinden kaynaklanan çekme ve basınç gerilmelerinin göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Uzay kafes, nervürlü çelik kubbe, yapısal analiz, yapısal performans.

### Evaluation of Structural Performance of Single Layer Steel Space Lattice Dome Systems

**Abstract:** Steel dome systems are roof covering systems with wide spans that require minimum number of load-bearing elements. Single layer dome systems which is the one of these dome systems, exhibit a different structural performance due to their geometric and design features. Therefore, we need to understand correctly the stress distribution and design the systems accordingly. This article presents the results of a study on the analysis and design of a single-layer steel space lattice dome system. Based on the Eurocode-1 and Turkish Building Earthquake Code 2018, the calculations of the loads acting on the structure and the designs in accordance with the AISC 360-10 regulations were carried out, and then, the cross-sections of the bars with critical stresses were checked according to the Turkish steel structure regulations. The findings show that the circle beams of the dome system have the highest tensile stresses in the skirt regions and the highest compressive stresses in the apex regions, and that the bars can be subjected to different stresses under asymmetrical loads. In addition, it has been observed that AISC 360-10 and Turkish steel structure regulations give very close and similar results. This study is an important guide for engineers dealing with single-layer dome systems, emphasizing that tensile and compressive stresses arising from dome geometry should be taken into account in structural design.

**Key words:** Space truss, ribbed steel dome, structural analysis, structural performance.

### 1. Giriş

Mimari tasarımın kalbinde, geniş açıklıklı yapıların tercih edilmesi ve yapısal elemanların azaltılması gibi prensipler yatmaktadır. Bu nedenle, mimarlar ve mühendisler, sürekli olarak geniş açıklıklı ve minimalistik yapı sistemlerinin potansiyelini keşfetmeye odaklanmaktadır. Bu öncelikler doğrultusunda, uzay kafes sistemleri özellikle ilgi çekici bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Uzay kafes yapılarının geniş açıklıklı ve aynı zamanda hafif olmaları, farklı yapı türlerinde kullanılmalarını teşvik etmektedir. Bu tür yapılar örneğin alışveriş merkezleri, tiyatrolar, stadyumlar, spor salonları, toplantı mekânları ve sanayi yapıları gibi çok çeşitli alanlarda geniş açıklıklı yapılara sıkça rastlamak mümkündür. Bu yapısal yaklaşımın temelinde, tasarımın işlevselliği, estetiği ve sürdürülebilirliği bir araya getirme düşüncesi bulunmaktadır. Geniş açıklıklı yapılar, iç mekânların daha esnek kullanılmasını sağlayarak farklı aktiviteler için uygun alanlar yaratırken, aynı zamanda yapıyı dış etkenlere karşı daha dayanıklı hale getirebilir. Örneğin, uzay kafes sistemleri, yapının dengeli bir şekilde yük dağıtmasını sağlar

\* Sorumlu yazar: [bektas1026@gmail.com](mailto:bektas1026@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9399-235X, <sup>2</sup> 0009-0008-9688-4491

ve böylece yapısal stabiliteyi artırır. Bunun yanı sıra, bu tür yapılar çevreye daha az etki eden yapım malzemeleri ve enerji tasarrufu sağlayabilir, böylece sürdürülebilir bir inşaat yaklaşımını destekler. Uzay kafes sistemlerinin kullanımı, mimarlık ve mühendislik alanındaki yenilikçi yaklaşımların bir yansımasıdır. Bu tür yapılar, karmaşık geometrilerin tasarım ve üretiminde ileri teknolojilerin kullanılmasını gerektirebilir. Bu durum, hem estetik hem de teknik açıdan farklılık yaratma potansiyeli sunar. Bu bağlamda, mimarlar ve mühendisler, geniş açıklıklı ve az elemanlı yapı sistemlerini kullanarak fonksiyonelliği, estetiği ve sürdürülebilirliği birleştirme amacıyla sürekli olarak yeni çözümler arayışındadır. Sonuç olarak, mimari tasarımın evrimi, geniş açıklıklı yapıların ve az elemanlı sistemlerin önemini vurgulamaktadır. Uzay kafes sistemleri, bu yaklaşımın özümsemiği ve farklı yapı türlerinde başarıyla uygulandığı bir örnektir. Bu tür yapılar, işlevselliği, estetiği ve sürdürülebilirliği dengeli bir şekilde bir araya getirerek geleceğin yapılarına yön vermektedir.

Tarihsel olarak, kubbe sistemleri mimarlar ve mühendisler tarafından çelik elemanlarının kullanılmadığı dönemlerde farklı yöntemlerle tercih edilmiştir. İlk kubbe sistemleri taş, tuğla ve ahşap gibi malzemelerden oluşturulmuş ve daha sınırlı açıklıklara sahip olarak inşa edilmiştir. Örneğin, MS 120 yılında İmparator Hadrian tarafından Roma'da inşa edilen Pantheon Tapınağı, tarihteki önemli kubbe örneklerinden biridir. Bu tapınakta kullanılan kubbe, daire planlı bir yapı üzerine oturtulmuştur. Daha sonraları, gelişmiş harçlar ve çeşitli yapı malzemelerinin kullanımıyla daha geniş açıklıklı kubbeler tasarlanmıştır.

Kubbe sistemlerinin evrimi, malzeme teknolojilerinin ilerlemesiyle paralel olarak gerçekleşmiştir. Betonarme kubbeler, daha geniş açıklıklı olmalarına rağmen inşaat süresini uzatma ve yapının ağırlığını artırma gibi nedenlerle çelik kubbelerin tercih edilmeye başlanmasının ardından, çelik endüstrisinin gelişmesiyle birlikte öne çıkmıştır. Çelik kubbeler, hafiflikleri, düşük maliyetleri ve imalat kolaylıkları nedeniyle mühendisler için daha çekici hale gelmiştir. Uzay kafes sistemleri ise farklı şekil ve yapı oluşturma sistemlerine sahiptir. Bunlardan biri de kubbesel uzay kafes sistemleridir. Bu sistemler, döneleli yüzeyler üzerine yerleştirilen eliptik yay veya tek eğrilikli çubuk sistemlerinden oluşmaktadır.

Bu çalışmada, tek katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin analizi ve tasarımı yapılmıştır. Bu sistem, tek katmanlı bir çelik ağ örgüsünden oluşur ve bu benzersiz yapı, hem yüksek dayanıklılığı hem de estetik görünümü bir araya getirir. Kubbenin geometrisi, yüksek taşıma kapasitesini sağlarken iç mekânlarda geniş ve sütunsuz bir kullanım alanı sunar. Çalışma kapsamında, öncelikle belirlenen konum ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak Eurocode yönergelerine uygun şekilde ölü yük, kar yükü [1] ve rüzgâr yükü [2] hesaplamaları gerçekleştirilmiş ve bu yükler SAP2000 programında tanımlanmıştır. Bu hesaplamalar, yapıya etki eden dışsal yükleri belirlemeye yardımcı olmuştur. Daha sonra, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e [3] uygun olarak deprem yükü de hesaba katılmıştır. Deprem yükü hesaplamaları, yapıya depremden kaynaklanan etkileri değerlendirmeye yönelik tasarım önlemleri almayı sağlamıştır. Sonrasında ise, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğine (ÇYTHYE-2018) büyük ölçüde benzeyen [4] AISC 360-10 [5] yönergeleri kullanılarak kubbenin elemanları boyutlandırılmıştır. Bu adım, yapı elemanlarının uygun boyutlara sahip olmasını ve taşıma kapasitelerini karşılamasını sağlamak için atılmıştır. Son olarak, elde edilen kubbe modelinin yük dağılımı ve kritik yük bölgeleri incelenmiştir. Bu analizler, kubbenin geometrisinden kaynaklanan önemli bilgileri ortaya çıkarmış ve yapısal tasarımın daha da geliştirilmesine katkı sağlamıştır.

Öncelikle, tasarım işlemi AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak gerçekleştirilmiş ve SAP2000 yazılımı kullanılarak kesit elemanları boyutlandırılmıştır. Bu boyutlandırma sonucunda, kritik elemanlar belirlenmiş ve tasarım süreci tamamlanmıştır. Daha sonra, ÇYTHYE-2018'in öngördüğü kesit kontrol kriterleri kullanılarak, belirlenen kritik elemanların kesit kontrolleri yapılmıştır. Bu adım, tasarımın yerel standartlara uygunluğunu ve yapıya dayanıklılığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Son olarak, AISC 360-10 yönetmeliğine göre yapılan tasarım ve ÇYTHYE-2018'e göre yapılan kesit kontrol sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, yapı elemanlarının boyutlandırılmasında ve kesit kontrollerinde farklılıkların olup olmadığını göstermektedir. Bu aşama, tasarımın güvenilirliği ve yapısal bütünlüğünün sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Bu araştırma, iki ayrı tasarım yönetmeliği kullanılarak yürütülen tasarım süreçlerinin sonuçlarını kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bu inceleme, farklı tasarım standartlarının nasıl farklı sonuçlara neden olduğunu anlamamıza yardımcı olacak ve tasarım süreçlerini daha etkili bir şekilde optimize etme imkânı sunacaktır. Elde edilen sonuçlar, her iki tasarım yaklaşımının avantajlarını ve kısıtlamalarını anlamamızı sağlayarak gelecekteki projelerde daha iyi kararlar vermeme katkıda bulunacaktır. Ayrıca, tek katmanlı çelik uzay kafes kubbe sisteminin ayrıntılı analiz ve tasarım sürecini ayrıntılı bir biçimde ele almaktadır. Elde edilen sonuçlar, benzer yapıların tasarımı ve inşasıyla ilgilenen mühendisler ve araştırmacılar için son derece değerli bir kaynak sunmaktadır. Bu sonuçlar, farklı tasarım seçeneklerinin ve yaklaşımlarının nasıl gerçek dünyada işlediğini

anlamamıza yardımcı olarak, gelecekteki projelerde daha bilinçli ve etkili kararlar alabilmemizi sağlayacaktır. Ayrıca, çelik yapıların kullanıldığı çeşitli uygulama alanlarında daha sağlam, güvenli ve dayanıklı yapılar inşa etmek isteyenler için bu çalışmanın sunduğu yöntemler ve sonuçlar önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

Çelik kubbelerin analizi konusunda yürütölen önemli çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıŐtır: Örneğin, Timoshenko ve Woinowsky-Kriger [6] "Plak ve Kabukların Teorisi" kitabında, kubbe sistemlerindeki gerilmelerin dağılımı ve deplasman tespiti için kullanılan hesap yöntemlerini ayrıntılı bir şekilde açıklamıŐlardır. Benzer şekilde, Timoshenko [7], "Elastik Burkulma Teorisi" adlı kitabında, kabuk elemanlarının burkulma sorununa yönelik çeşitli çözümler sunmuş ve bu elemanların maksimum yük noktasından önce dahi burkulabileceğini göstermiştir. Papadopoulos ve LoRicco [8] BükreŐ Ulusal Ekonomi KöŐkü'nün çelik kubbesinin burkulma ve ters dönme sorunlarını inceleyerek, özellikle düzensiz dağılmış kar yüklerinin bölgesel burkulmaya neden olabileceğini açıklamıŐlardır. Soykan [9], farklı eğrilik formlarına sahip kubbelerin stabilitesini, deplasmanlarını ve birim alan ağırlıklarını karşılaştırmalı bir şekilde analiz ederek değerli bilgiler sunmuştur. Çiftçi [10], uzay kubbe sistemlerindeki geometrik deformasyon ve doğrusalsızlığın stabilite üzerindeki etkilerini belirleyerek, bu tür yapıların davranışını anlamamıza katkı sağlamıştır. Karabulut [11], geniş açıklıklı uzay kafes çatı sistemlerinin boyutlandırılması ve tasarım esaslarını ele alarak, bu yapıların performansını detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Aynı şekilde, Kara [12], farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı kubbelerin performansını ve maliyet analizlerini karşılaştırarak önemli sonuçlara ulaşmıştır. Özcan [13], asimetrik yüklerden kaynaklanan stabilite sorunlarını ele alarak nervürlü ve schwedler tipi kubbelerin davranışını incelemiş ve farklı tasarımların performansını karşılaştırmıştır. Yılmaz [14], tek katmanlı kubbe sistemlerinin stabilitesini kiriş berkitmeleri kullanarak analiz ederek, bu tür yapıların optimize edilmiş bir şekilde tasarlanmasının potansiyelini göstermiştir. Adnanoğlu [15], ekonomik ve dayanıklı kubbe tasarımları için ribbed ve schwedler kubbe sistemlerini parametrik olarak araŐtırarak önemli bir katkı sağlamıştır. Wang ve Jiang [16], farklı tasarım stillerine sahip küresel yapıların rüzgâr yüklerini sistematik olarak analiz ederek, tasarım önerileri sunmuŐlardır. Son olarak, Bektaş [17], farklı yükseklik/açıklık oranlarına sahip tek katmanlı ve çift katmanlı çelik uzay kafes kubbe sistemleri oluşturarak, bu yapıları AISC-360-10 yönetmeliğine göre tasarlayıp ÇYTHYE-2018'e göre kontrol ederek iki yönetmeliğin sonuçlarını karşılaştırmış ve benzer sonuçlar elde etmiştir.

Tüm bu hususlar göz önüne alındığında, bu çalışma aynı zamanda çelik kubbelerin analizi konusundaki gelecekteki araştırmalara da katkı sağlamayı amaçlamaktadır. Bu çalışmanın elde ettiği bulgular, bu alanda ileriye yönelik daha fazla bilgi ve anlayıŐın oluŐturulmasına katkı sağlayabilir ve gelecekte yapılacak projelerin daha güvenilir ve sürdürülebilir bir şekilde tasarlanmasına temel oluŐturabilir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kubbesel uzay kafes sistemlerinin sınıflandırılması

Kubbesel uzay kafes sistemleri, taşıyıcı elemanların ve düğüm noktalarının bir araya gelerek oluşturduğu ve yükleri tüm çubuklara etkin bir şekilde dağıtan örtü sistemleridir. Bu sistemler, tasarımın doğasına bağlı olarak farklı alt tiplere ayrılabilir. Kubbesel uzay kafes sistemlerinin farklı ana tasarım tipleri Şunlardır:

1. Radyal Nervürlü Kubbe Sistemleri: Radyal nervürlü kubbe sistemleri, dikey ekseninde dönen radyal kemerlerle tasarlanır. Bu kemerler, çubuk elemanların keŐiŐtiđi düğüm noktalarında birleŐir. Bu tür kubbeler genellikle küçük açıklıklı alanlarda kullanılırken, montaj kolaylığı ve maliyet avantajı sunar. Ancak büyük açıklıklar için daha büyük kesitlere ihtiyaç duyulabileceğinden maliyet ve montaj zorlukları ortaya çıkabilir.
2. Schwedler Kubbe Sistemleri: Schwedler kubbe sistemleri, simetrik olmayan yükleri güvenle taşıyabilmesi için diyagonal nervürleri kullanan bir tasarımı temsil eder. Bu tür kubbeler, büyük açıklıklara sahip yapılarda tercih edilir. Diyagonal nervürlerin yanı sıra yatay halkalar ve yay kiriŐleriyle desteklenirler. Bu tasarım, yük transferini etkinleŐtirir ve nervür kiriŐlerini birleştiren eş merkezli halkaların güvenliğini artırır.
3. Lamella Kubbe Sistemleri: Lamella kubbe sistemleri, kubbenin çubuk yaylarını eŐkenar dörtgenlere benzeyen lamella levhalarla birleştirerek oluşturur. Lamella levhaları kubbenin yüzeyinde bulunur ve stabilizeyi artırır. Alt kısımda çekme çemberi, üst kısımda basınç çemberi yer alır ve gerilmelerin dağıtılmasını sağlar. Lamella kubbeler, yüksek rüzgâr yüklerine karşı dayanıklıdır ve geniş açıklıklı yapılarda kullanımı uygundur.
4. Jeodezik Kubbe Sistemleri: Jeodezik kubbe sistemleri, kiriş ve düzlemlerin geometrik şekillerle birleştiği bir yapıya sahiptir. Bu tasarım, kemer sistemleri yerine jeodezik yapıları kullanır. Küresel kubbe formları yaygın olup yükü kendi içinde dağıtarak taşıma işlevini gerçekteŐtirir. Kubbe alt halkası farklı taşıyıcı elemanlara

veya zemine yerleştirilebilir. Jeodezik kubbeler, montaj kolaylığı nedeniyle geniş bir kullanım alanına sahiptir.

5. Üç Doğrultuda Izgara Kubbe Sistemleri: Bu sistemler, çubuk elemanların eşit geometrilerle birleştiği bir tasarımı yansıtır. Kubbenin ana kirişleri ile birbirine bağlanan ve ikincil çubuk elemanlarıyla desteklenen bir yapı oluşturulur. Bu sayede yükler homojen bir şekilde dağıtılır. Üç doğrultuda ızgara kubbeler, farklı geometrik formlara sahip olabilir ve hem ağırlık hem de alan dağılımı açısından etkili bir tasarım sunar. Büyük açıklıklı yapılar için ideal bir seçenektir.

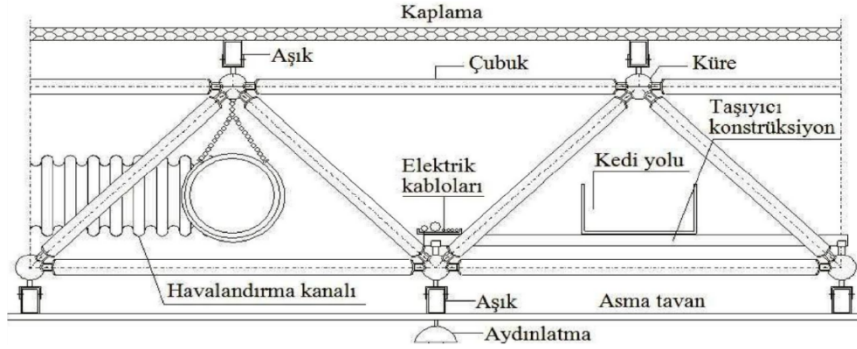
Tüm bu farklı kubbesel uzay kafes sistemleri, tasarım gereksinimlerine ve yapısal performansa bağlı olarak tercih edilir. Her bir sistem, belirli bir açıklık veya yük taşıma gereksinimini en iyi şekilde karşılamayı amaçlar.

## 2.2. Kubbesel Uzay Kafes Bileşenleri

Uzay kafes sistemleri, karmaşık bir yapıya sahip olup, çeşitli temel bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler, sistemin sağlamlığını ve işlevselliğini sağlamak üzere bir arada çalışır. Kubbesel uzay kafes sistemlerinin bileşenleri ve bu bileşenlerin detayları şu şekildedir:

1. Çubuklar: Uzay kafes sistemlerindeki en temel taşıyıcı elemanlardan biridir. Yükleri taşıma işlevini üstlenen ve iki düğüm noktasını birbirine bağlayan çubuk elemanları, farklı malzemelerden üretilebilir. Genellikle çubuk elemanlarının dairesel kesitleri tercih edilse de, T, I, L, U ve kare gibi farklı kesit şekilleri de kullanılabilir. Çubuk elemanlarının boyutları, malzemesi ve şekli, sistemin taşıma kapasitesini ve performansını etkiler.
2. Düğüm Noktaları: Çubuk elemanlarının kesişim noktalarını oluşturan ve taşıma sistemini bir arada tutan önemli parçalardır. Düğüm noktaları, çubukların birleştiği ve yüklerin dağıtıldığı bölgelerde bulunur. Çubukların bağlantıları, düğüm noktalarının geometrisine ve yüklere maruz kalma durumuna göre tasarlanır. Tasarım şekline göre moment aktaran ve moment aktarmayan olmak üzere iki şekilde tasarlanır. Tek katmanlı kubbe yapılarında moment aktaran çift katmanlı sistemlerde ise moment aktarmayan olarak tasarlanmaktadır. Bu noktaların sağlam ve stabil olması, sistemin genel güvenilirliği açısından kritiktir. Şekil 1’de çift katmanlı ve moment aktarmayan bir uzay kafes sisteminin düğüm noktaları gösterilmiştir.
3. Mesnetler: Uzay kafes sistemlerinin ana taşıyıcı elemanlarını zemine veya diğer yapı elemanlarına bağlayan bileşenlerdir. Mesnetler, yüklerin güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlayarak sistemin dayanıklılığını destekler. Mesnet tipleri, yapısal gerekliliklere göre değişebilir. Doğrudan zemine oturan sistemlerde mesnetler, zeminle bağlantıyı sağlar ve yük transferini yönetir.
4. Örtü Gereçleri: Kubbesel uzay kafes sistemlerinin montajı tamamlandıktan sonra üzerini kaplayan ve sistemle dış etkenler arasında bir bariyer görevi gören elemanlardır. Bu gereçler, yapıya gereksiz yük eklememek için hafif olmalı ve aynı zamanda çeşitli hava koşullarına karşı dayanıklı olmalıdır. Isı ve ses yalıtımı gibi ek özelliklere sahip olabilirler.
5. Temeller: Uzay kafes sisteminin zemine oturan kısmıdır ve tüm yükünü zemine ileten bileşenlerdir. Kubbenin tipine, büyüklüğüne ve taşıdığı yüke göre farklı şekil ve boyutlarda tasarlanabilirler. Temellerin doğru bir şekilde tasarlanması, sistemin yüklere karşı dayanıklılığını ve stabilitesini sağlar.
6. Yardımcı Elemanlar: Uzay kafes sistemi tasarımı ve kullanım gereksinimlerine göre çeşitli yardımcı elemanlar kullanılabilir. Bu elemanlar, çubukların birleşim yerlerini güçlendiren, malzeme özelliklerini optimize eden veya yapıya ek işlevler kazandıran bileşenler olabilir. Havalandırma sistemleri, yangın koruma sistemleri, ses yalıtımı, aydınlatma, elektrik tesisatı gibi çeşitli yardımcı elemanlar sistemin performansını artırabilir.

Bu bileşenler, kubbesel uzay kafes sistemlerinin başarılı bir şekilde tasarlanması ve uygulanmasında merkezi bir rol oynar. Her bir bileşen, sistemin güvenli, dayanıklı ve işlevsel bir şekilde çalışmasını sağlar. Uzay kafes sistemlerinde kullanılan bu bileşenler, tasarım esnasında ve uygulama aşamasında büyük önem taşır. Şekil 1, bu bileşenleri daha ayrıntılı bir şekilde göstermektedir.



Şekil 1. Çelik uzay kafes bileşenleri [9]

### 2.3. Kubbesel Örtü Sistemlerin Yapısal Davranışı

Kubbesel yapı sistemlerinin yapısal davranışı, hem yapıda kullanılan malzemelerin özelliklerine hem de kubbenin geometrisine bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Yapısal davranışların anlaşılması, bu sistemlerin tasarımı ve malzeme seçiminde büyük bir öneme sahiptir. Kubbesel örtü sistemlerinin yapısal davranışını tam anlamıyla kavrayabilmek adına farklı malzemelerin ve sistemlerin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Aşağıda, kubbesel örtü sistemlerinin yapısal davranışını yansıtan 7 ayrı gruba dair geniş bir perspektif sunulmuştur:

1. Yığma kubbeler: Bu tip kubbelerde genellikle taş veya tuğla gibi dayanıklı kâgir malzemeler kullanılır. Yapının altındaki yükleri taşıma kapasitesi yüksektir; ancak, çekme kuvvetleri statik açıdan endişe kaynağı olabilir. Bu sorun, yanal dikme payandaları, yarım kubbeler veya uçan payandalar gibi yapısal ayarlamalarla ele alınabilir.
2. Kabuk kubbeler: Betonarme malzemeden inşa edilen bu kubbelerde, yükler üst bölgelerde basınç ve alt bölgelerde çekme gerilmeleri şeklinde dağılır. Alt bölgelerdeki çekme gerilmeleri, çelik donatılarla güçlendirilerek dengelenir.
3. Kemer taşıyıcılı kubbeler: Bu tür kubbelerde merkezde birleşen bir basınç halkası yoktur; bunun yerine kubbe kemerleri paralel olarak tasarlanır. Örneğin, Oita Stadyumu gibi büyük açıklıklı kemer taşıyıcılı kubbeler bu kategoriye örnek verilebilir.
4. Kaburgalı kubbeler: Kaburga ve kaburga dilimlerinin bir araya geldiği kubbeler olarak kabul edilir. Kaburgalar vasıtasıyla yükler çemberin eteğinden iletilir. Tarihi eserlerde sıkça kullanılan örneklere Floransa Katedrali gibi rastlanabilir. Bu tür kubbeler yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda tercih edilir ve farklı tasarım seçenekleri sunar.
5. Çubuk ağı kubbeler: Kubbe yüzeyi çubuk ağları ve düğüm noktalarıyla farklı geometrik formlara ayrılarak oluşturulan bu tür kubbeler, nervürlü, schwedler, lamella, jeodezik, üç doğrultulu sistemler gibi varyasyonlar içerir. Gerilmeler, çubuk ağları boyunca eşit bir şekilde zemine iletilir.
6. Kablo sistemli kubbeler: Çekme gerilimine karşı dayanıklı çelik kablolarla desteklenen sistemlerdir. Kubbe yükleri, kablolar aracılığıyla dikey taşıyıcı sistemlere aktarılır. Bu şekilde kubbe sistemleri çelik kablolarla güçlendirilir.
7. Pnömatik kubbeler: Basınçlı hava ile gerilmeye sahip membran yüzeyler kullanılarak ayakta tutulan bu tür sistemler, yalnızca çekme gerilimine karşı direnç gösterir. Hava basıncı, üst yüzeydeki membranın stabilitesini sağlayan kabloların yardımıyla bu kubbeleri destekler.

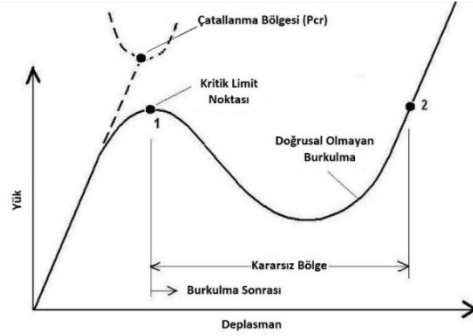
Yukarıda sıralanan 7 farklı grup, kubbesel örtü sistemlerinin yapısal davranışını ifade eder ve malzeme seçimine, geometriye ve sistem tasarımına bağlı olarak değişiklik gösterir. Kubbenin yapısal davranışının kavranması, doğru tasarımın gerçekleştirilmesi ve güvenli bir uygulama için kritik bir öneme sahiptir.

### 2.4. Çelik Kubbe Sistemlerinin Stabilitesi

Çelik kubbe sistemlerinde stabilite meselesi, tasarım sürecinde büyük bir öneme sahiptir. Özellikle burkulma davranışı, kafesli yapıların dayanıklılığı için hayati bir faktördür. Bu tür yapılar, çubuklar veya bağlantı elemanları arasındaki lineer olmayan özelliklerden dolayı aşırı yükler altında istikrarsız hale gelebilirler. Burkulma genellikle düzlem içi basınç kuvvetlerinin etkisiyle ortaya çıkar ve genellikle malzeme mukavemetinden çok yapısal istikrarsızlık nedeniyle meydana gelir. Bu nedenle, yapının yük altında dahi görünürde sağlam olsa bile burkulma

analizi yapılmalı ve gerektiğinde elemanların veya kafesin stabilitesi artırılmalıdır. Bunu sağlamak için kafes yüksekliği veya malzeme atalet momenti gibi tasarım faktörleri ayarlanabilir.

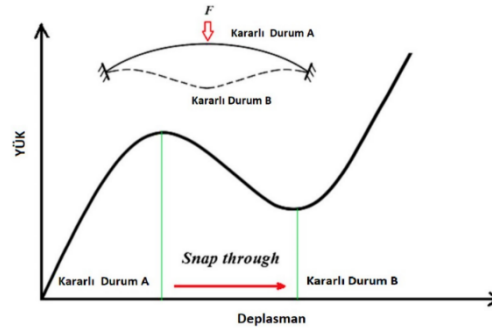
Özellikle kafes sistemlerinde bir elemandaki burkulma davranışı, beklenmedik genel çökme olaylarına yol açabilir. Bu nedenle, eleman burkulmasının sistemsel dayanıklılık üzerinde büyük bir etkisi olduğu söylenebilir. Şekil 2'deki grafik incelendiğinde, burkulma davranışının doğrusal olmayan ve "çatallanma burkulması" olarak adlandırılan bir model izlediği görülür. Bu davranış, elastik sınırların ötesine geçildiğinde ani bir şekilde meydana gelir. Çatallanma bölgesinde, eleman zayıf bölgesine doğru deforme olur. Bu aşamada yapı elemanı kararsız hale gelir ve deplasman yönüne doğru doğrusal olmayan bir burkulma eğrisi çizer. Bu değişim hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşebilir. Özellikle yüzey eğriliğine sahip kubbe ve tonoz gibi yapı sistemlerinde, örtü sistemi ters yönde burkulup tamamen çökebilir. Bu nedenle, kubbe ve tonoz yapılarında yükseklik/açıklık oranının burkulmaya karşı en az etkileyecek şekilde tasarlanması tavsiye edilir.



Şekil 2. Nonlineer ve çatallanma burkulma davranışı grafiği [18]

Kubbe sisteminin yapısal burkulma davranışı yakından incelendiğinde, yapı elemanının kararlı bir durumdan kararsız bir duruma geçişinin önemli bir davranış biçimi olduğu gözlenir. Şekil 3'te sunulan grafik, bu geçişi görselleştirirken, kararlı A noktasından kararsız B noktasına kadar olan kritik bölgenin belirgin bir şekilde işaret edildiğini gösterir. Bu bölge, sistem kararlılığını kaybettiği ve yapının burkulma eğiliminin ortaya çıktığı yerdir. Kritik bölgeye gelene kadar, sisteme uygulanan yükler nedeniyle enerji birikir. Ancak, kritik yük eşiği aşıldığında, biriken enerji serbest bırakılır. Bu süreç, elemanın kararsız hale gelip dönme hareketi gerçekleştirmesiyle sonuçlanır. Bu şekil değişimi, hızlı ve ani bir şekilde gerçekleşebilir. Yani, yapı elemanı, daha önce kararlı bir denge halinde bulunduğu konumdan, aniden kararsız bir konuma geçer. Bu burkulma davranışı, kubbe sistemlerinin belirgin bir özelliğini temsil eder. Bu tür yapılar, genellikle yük altındayken bu tür burkulma davranışlarını sergileyebilirler. Bu nedenle, tasarım aşamasında bu kararsızlık durumları dikkate alınmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır. Yapı elemanlarının veya sistemin genel stabilitesinin artırılması için tasarım parametreleri ayarlanabilir. Bu şekilde, kubbe sistemi burkulma ve istikrarsızlık sorunlarına karşı daha dayanıklı hale getirilebilir.

Çelik kafes sistemlerinde meydana gelen burkulma davranışı, yapının yapısal sağlamlığı ve dayanıklılığı açısından kritik bir faktördür. Bu davranış, düğüm noktalarının serbestlik derecelerinin büyük ölçüde etkilediği bir süreçtir. Düğüm noktalarında yeterli rijitlik sağlanamadığı veya elemanlar eksenel gerilme dışındaki moment ve kesme kuvvetlerine uygun bir şekilde tasarlanmadığı durumlarda, eleman burkulma davranışı gösterebilir.



Şekil 3. Tersine dönerek burkulma davranışında yük-deplasman grafiği [19]

Bu tür burkulma kararsızlıkları, tasarım aşamasında mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu analiz iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir: lineer ve doğrusal olmayan burkulma analizi. Lineer burkulma analizi, elastik



yapıda burkulma dayanımını ve çatallaşma noktalarını belirlerken, doğrusal olmayan burkulma analizi, elemanın en kararsız hale geldiği noktayı bulur ve gerçeğe en yakın kritik yükü tahmin etmek için kademeli yük artışını sağlar. Burkulma sonrası stabilite kaybı ve sistem stabilitesi gibi faktörler, genellikle doğrusal olmayan burkulma analiziyle belirlenebilir.

Kubbe sistemlerinde eleman burkulması, genellikle tek bir elemanın etkilenmesiyle başlar ve ardından yapının daha geniş bir bölgesine yayılabilir. Bu, yapı geometrisini etkileyebilir ve yerel veya global burkulma kararsızlığını tetikleyebilir. Bu hassas durum nedeniyle, burkulma boyunun azaltılması veya atalet momentinin artırılmasıyla kritik yüke maruz kalan elemanın burkulma davranışı önemli ölçüde azaltılabilir. Ancak, burkulma davranışını etkileyen kesit dışındaki diğer faktörleri göz ardı etmemek önemlidir. Özellikle birleşim elemanlarının eksantrik yük iletimine neden olan kusurları, burkulma davranışını ciddi şekilde etkileyebilir. Bu nedenle, dikkatli bir tasarım ve uygulama gereklidir. Eleman burkulması için Euler Burkulma teorisi kullanılarak kritik yük tespit edilebilir. Bu teori, elastisite modülü, etkili uzunluk, burkulma boyu katsayısı ve atalet momenti gibi faktörleri dikkate alarak kritik yükü hesaplar.

Kubbe sistemlerinde yerel burkulma davranışı da sıkça görülür. Özellikle tek katmanlı kubbelerde bu davranış daha yaygındır ve genellikle düğüm noktalarından kaynaklanır. Kubbe düğümlerinde bulunan içten asılı aydınlatma ve havalandırma gibi elemanlar, yerel burkulma davranışına neden olabilir. Bu tür elemanların kubbe düğümlerinde yarattığı yoğun tekil yük, burkulma davranışını tetikleyebilir. Ayrıca, yerel burkulma davranışı tersine dönerek burkulma (snap-through) olarak da ortaya çıkabilir. Bu durum, bölgesel veya sistemin tamamının tersine dönerek burkulması şeklinde gerçekleşebilir. Tersine dönerek burkulma, sistem stabilitesini etkileyebilir ve farklı gerilmelerin oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, yapısal tasarım ve analiz sürecinde yerel burkulma davranışının öngörülmesi ve önlenmesi kritik öneme sahiptir.

Global burkulma davranışı ise bir yapının toptan göçmesine neden olabilen ciddi bir kararsızlık durumunu ifade eder. Özellikle çift eğrilikli sistemlerde, tek eğrilikli sistemlere göre daha fazla global kararsızlık görülür. Bu tür sistemlerin yük taşıma kapasiteleri daha yüksek olabilir, ancak yapısal simetri bozulduğunda global burkulma davranışı artar. Dış etkenler, simetri bozuklukları, yük dağılımları gibi faktörler, bu davranışın ortaya çıkmasında etkili olabilir. Global burkulma davranışını etkileyen yapısal hatalar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Sonuç olarak, çelik kafes sistemlerinde burkulma davranışı, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken karmaşık bir konudur. Yapının stabilitesini sağlamak için burkulma analizi yapılmalı, eleman veya sistem stabilitesi artırılmalı ve yerel/global burkulma davranışı dikkatlice yönetilmelidir. Doğru tasarım ve analiz süreci, bu tür kararsızlıkların kontrol altına alınmasını ve yapısal güvenliğin sağlanmasını sağlar.

## 2.5. Kubbesel Uzak Kafes Tasarım Ve Analizi

Bu araştırma kapsamında, tek katmanlı kubbe modelinin analiz ve tasarımı detaylı bir şekilde yapılmıştır. Uzak kafes sistemlerinin ticari veya akademik çalışmalar sırasındaki analizleri için geniş bir yelpazede bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, ilgili yönetmeliklere uygun olarak hesaplama metodlarını yapılandırabilme yeteneğine sahiptir. Genelde, bu yazılımlar yapısal analizleri gerçekleştirmek için sonlu eleman yöntemini kullanırlar. Her organizasyon, kendi yapısal analiz ihtiyaçlarına uygun farklı bilgisayar yazılımlarını tercih edebilir. Uzak kafes sistemlerinin analizinde sıkça tercih edilen yazılımlardan biri SAP2000 programıdır. Bu çalışma kapsamında incelenen sistem modellerinin analiz ve tasarım süreçleri SAP2000 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu program, üç boyutlu doğrusal olmayan statik ve dinamik analiz yeteneklerinin yanı sıra yapısal elemanların tasarımını kolaylaştıran özellikler de içerir. Ayrıca, farklı ülkelerin standartlarına uygun olarak çözümler üretme kapasitesine sahiptir.

Tasarım aşamasında, Türk standartlarına uygun tasarım ilkeleri uygulanmıştır. Çelik yapıların tasarım ve hesaplamaları, Yük ve Dayanım Katsayıları İle Tasarım (YDKT) veya Güvenlik Katsayıları İle Tasarım (GKT) prensipleri temel alınarak yapılır. YDKT prensibine göre, çelik yapıların taşıma kapasiteleri yük ve dayanım katsayılarına göre tasarlanırken, GKT prensibinde ise güvenlik gerilmelerine dayalı bir tasarım yaklaşımı benimsenir. Bu makale çalışmasında çelik kubbe tasarımında YDKT yöntemi tercih edilmiştir.

Yük kombinasyonları, farklı yük türlerinin bir araya getirilmesi ile elde edilen karakteristik yüklerdir. Bu karakteristik yükler arasında G (Sabit Yük), Q (Hareketli Yük), S (Kar Yüğü), W (Rüzgâr Yüğü) ve E (Deprem Etkisi) bulunmaktadır. YDKT prensibi gereğince, tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, öngörülen yük veya yük kombinasyonlarına göre hesaplanan karakteristik dayanım değerine eşit veya daha büyük olmalıdır. Bu prensip,  $R_u \leq \Phi R_n$  şeklinde ifade edilir. Burada  $R_u$ , YDKT kombinasyonları altında hesaplanan dayanımı;  $R_n$ , karakteristik dayanımı;  $\Phi$  ise tasarım dayanımı katsayısını temsil eder.

Tasarım katsayısı ile çarpılmış tasarım dayanımı, ÇYTHYE-2018'de belirtilen YDKT yük kombinasyonları kullanılarak belirlenir. Bu yük kombinasyonları, farklı sistem kombinasyonları ve yapısal etkiler göz önünde bulundurularak tasarım dayanımını belirlemek amacıyla kullanılır. Aynı şekilde, taşıyıcı elemanların deplasman kontrolü için kullanılabilir sınır durumları altında çatı sistemlerinin düşey yer değiştirmeleri hesaplanmalıdır. Yatay yer değişim durumunda ise kaplama malzemesi sehim durumuna göre değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, bu makale çalışmasında tek katmanlı kubbesel uzay kafes sistemleri detaylı bir şekilde tasarlanmış, analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Tasarım aşamasında Türk standartlarına uygun prensipler ve YDKT yöntemi uygulanmıştır. Yük kombinasyonları ve tasarım dayanımı katsayıları, ÇYTHYE-2018'de belirtilen tablolara göre belirlenmiştir. Analiz ve tasarım süreçlerinde SAP2000 programı tercih edilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde, kubbesel uzay kafes sistemlerinin sağlam, güvenli ve istikrarlı bir şekilde tasarlanması ve değerlendirilmesi sağlanmıştır.

## 2.6. Tek Katmanlı Kubbe Modeli Analizi

Tek katmanlı kubbe sistemleri, yapı tasarımında özellikle tercih edilen modellerden biridir. Bu kubbe türü, çift katmanlı kubbe yapılarına göre birçok avantaja sahiptir ve pek çok projede tercih edilen bir tasarım seçeneğidir. Tek katmanlı kubbe sistemlerinin tercih edilme nedenleri arasında üretim süreçlerinin daha basit olması ve çift katmanlı kubbelere göre belirli tasarım sınırlarında daha düşük maliyetli olması bulunmaktadır. Üretim aşamasında çift katmanlı kubbe sahipleri karmaşıklık ve detaylı işçilik ihtiyacı, tek katmanlı kubbe sahiplerine göre daha azdır. Bu durum, inşaat projelerinin hem süre hem de maliyet açısından daha verimli bir şekilde yönetilmesine olanak tanır.

Tek katmanlı çelik kubbe analizi, bir dizi kritik faktörün incelenmesini gerektirir. Bu faktörler arasında kubbenin boyutu, geometrisi, kullanılan malzemenin özellikleri ve üzerine gelecek yük koşulları gibi unsurlar yer alır. Kubbenin yapısının davranışı, bu parametrelerin kombinasyonuna bağlı olarak farklılık gösterir. Analitik değerlendirmenin ilk adımı, kubbenin geometrisinin ve kullanılacak malzemenin özelliklerinin belirlenmesidir. Bu parametreler, tasarım sürecinin temel taşlarını oluşturur. Ardından, kubbenin statik denge koşulları göz önünde bulundurulur ve bu koşullar altında kubbenin gerilme, deformasyon, moment ve burulma gibi mekanik performans kriterleri hesaplanır. Kubbenin statik analizi, yapının üzerine gelebilecek farklı yük türlerini ve bu yükler altında kubbenin taşıma kapasitesini değerlendirir. Dışsal faktörler arasında rüzgâr, kar yükleri ve deprem gibi etkenler yer alırken, içsel faktörler kubbenin öz ağırlığı ve hareketli yüklerdir. Yük analizi, tasarımın taşıma kapasitesini ve güvenliğini sağlamak adına kritik öneme sahiptir. Kubbenin gerilme analizi, kubbenin yük altında nasıl davrandığını ve farklı bölgelerinde oluşan gerilmeleri değerlendirir. Bu analiz, yapısal bütünlüğün sağlanması için hayati önem taşır. Kubbenin deformasyon analizi ise, kubbenin yük altında nasıl şekil değiştirdiğini belirler. Deformasyon analizi, tasarımın estetik ve fonksiyonel yönlerini ele alır. Kubbenin moment ve burulma analizi, çubuk elemanların moment ve burulma kabiliyetlerini inceler. Bu analizler, kubbenin taşıyıcı elemanlarının dayanıklılığını ve güvenliğini belirlemeye yönelik önemli veriler sunar. Kubbenin moment ve burulma kapasitesi, çubuk elemanların geometrisi, malzeme özellikleri ve yük taşıma karakteristiği gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Tek katmanlı model kubbe sistemi, 600 eleman ve 216 moment aktaran düğüm noktasından oluşan bir yapıdır. Bu yapı, tek katmanlı bir kubbe tasarımını temsil eder ve 28 metre açıklık ile 7,5 metre yüksekliğe sahiptir. Kubbenin tasarımında 2 metre çapında bir basınç halkası ve 24 metre çapında bir çekme halkası yer almaktadır. Toplamda 24 adet özdeş meridyen kafes sistemi ve 7 adet paralel halka kullanılarak kubbe inşa edilmiştir. Kubbenin perspektif ve plan görünümü şekillerle görselleştirilmiştir. Bu model, Dicle Üniversitesi arazisinde Enlem: 37,91732 Boylam: 40,27585 konumuna konumlandırılacak ve Diyarbakır ilinde gerçekleştirilecek bir inşaat projesi olarak planlanmıştır. Bu seçim, kubbenin çevresel ve coğrafi faktörlere uygunluk göstermesini sağlamak amacıyla belirlenmiştir.

Model'in elemanları için belirlenen malzeme sınıfı, akma gerilmesi 355 MPa olan S355 çeliğidir ve bu çelik malzemesinin mekanik özellikler, EN 1993-1-1 standardı 3.2.6 maddesinde tanımlanan değerlere uygun olarak seçilmiştir.

Model'in kaplama malzemesi olarak, Model-1 ile aynı etkin kaplama sisteminden olan lamine cam kaplama tercih edilmiştir. Bu kaplama malzemesi, özellikle estetik ve fonksiyonel gereksinimleri bir araya getirme konusundaki etkili çözümler sunmaktadır. Model'deki kubbenin kaplaması için lamine cam malzemesi tercih edilmiştir. Bu seçim, kubbenin özellikle geniş alanlarını örtmek için uygun bir çözüm sunmaktadır. Lamine cam,

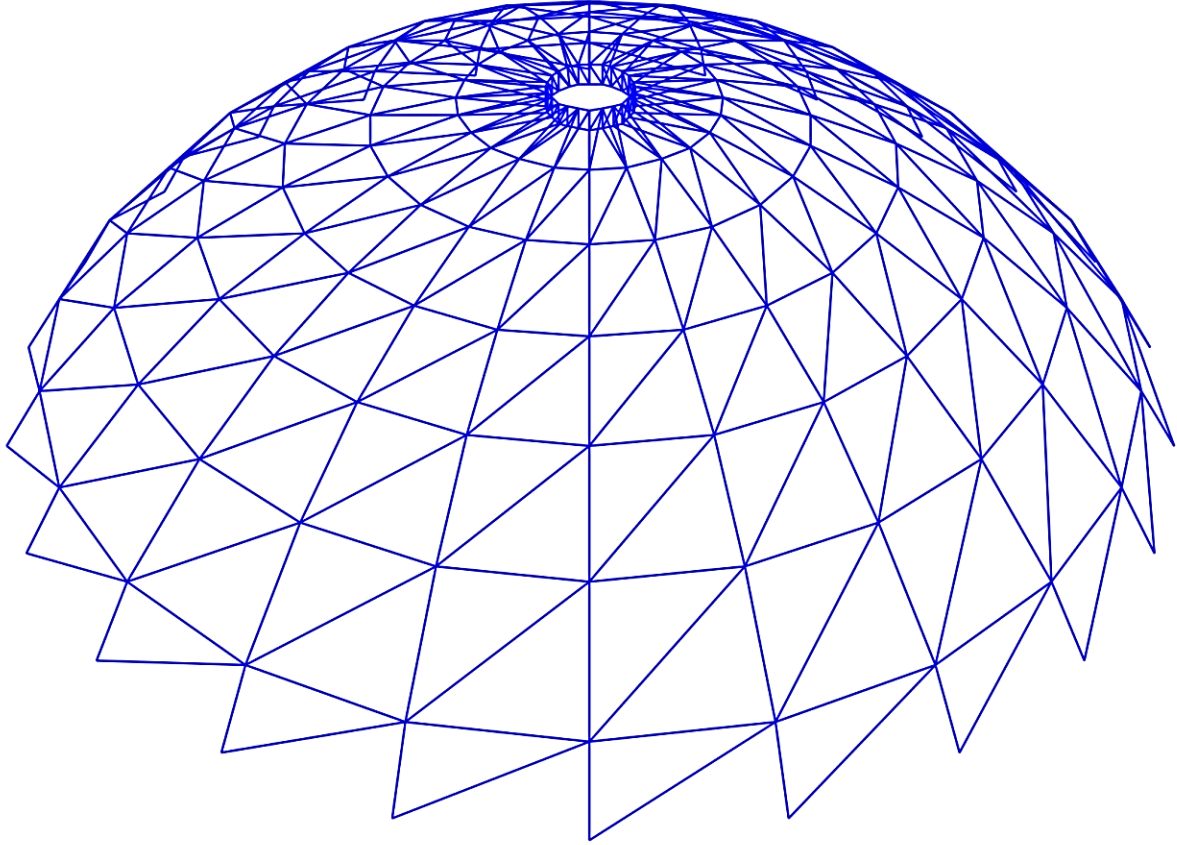
kubbenin i mekânını doğal güneş ıŐıđından faydalanarak aydınlatmayı sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Bu sayede yapının iç mekânı hem doğal ıŐıktan yararlanırken hem de estetik bir görünüm elde edilmiştir.

Aynı zamanda, kubbenin yüzeyi yansıtıcı özellikli malzemelerle kaplanarak güneş ıŐınlarının neden olduğu yüksek ısınmanın önüne geçilmiştir. Bu, kubbenin i mekânının aşırı ısınmasını engelleyerek konforlu bir kullanım sağlamayı amaçlar. Kubbenin üzerinde yansıtıcı malzemelerin kullanılması, aşırı ısınma ve enerji tüketimi gibi sorunların minimize edilmesine yardımcı olur.

Sonuç olarak, lamine cam kaplama, Model kubbesinin aydınlatılmasını doğal güneş ışığı ile sağlamak amacıyla tercih edilmiş ve yansıtıcı kaplama malzemeleri ile güneş ıŐınlarının neden olduğu aşırı ısınmanın önüne geçilmiştir. Bu, hem yapı içinde konforlu bir ortam sağlamak hem de enerji verimliliğini artırmak açısından önemli bir tasarım kararıdır.

Kubbe tasarımında kullanılan kesit özellikleri, kubbenin gerilme dağılımına uygun Şekilde ŐeilmiŐtir. Meridyen kirişleri için IPE profil kullanılmıştır ve bu profil türü BS EN 10365 standardında verilen değerlere uygun olarak tercih edilmiştir. Çember ve diyagonal elemanlar ise kutu profil olarak gruplandırılmıŐ ve BS EN 10210-2 standardında sunulan kutu profil değerleri kullanılarak ŐeilmiŐtir.

Bu Şekilde, Model'nin her bir bileşeni, malzeme Őeimi ve kesit özellikleriyle detaylı bir Şekilde belirlenmiş ve tasarlanmıştır. Bu özenli yaklaşım, yapısal btnlğu sağlama, dayanıklılığı artırma ve tasarımın estetik ve işlevsel gereksinimleriyle uyumunu sağlama amacını taşımaktadır.



Şekil 4. Model perspektif görünüŐü [17]

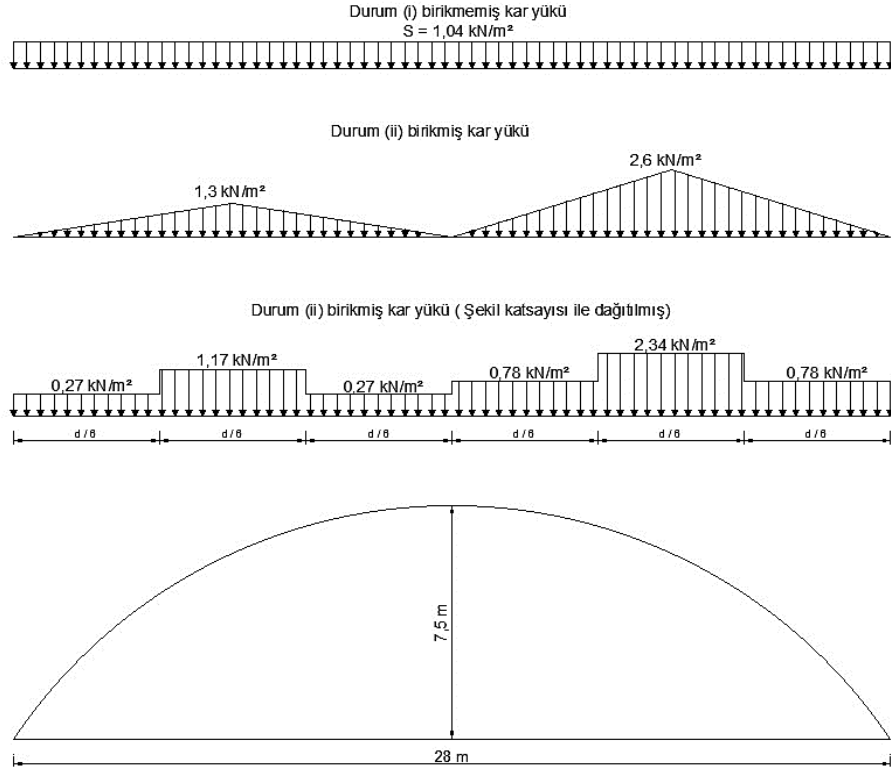
## 2.7. Model Hesap Metodunda Kullanılan Yükler

Model alıŐması kapsamında, çeşitli yük tiplerinin ayrıntılı hesaplamaları yapılarak SAP2000 programına entegre edilmiştir. Bu yük tipleri aşağıda detaylı bir Şekilde açıklanmıştır:

1. Sabit ve Hareketli Yükler: Yapının taşıyıcı sistemini etkileyen temel yükler, sabit yükler ve hareketli yükler olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Sabit yükler, yapı elemanlarına sürekli bir etki uygulayan yüklerdir. Örneğin, taşıyıcı sistemin profilleri, kaplama elemanları ve tesisat yükleri bu kategoride yer alır. Bu yükler genellikle yerçekimi ivmesi yönünde etki gösterir ve taşıyıcı elemanların dayanıklılığını

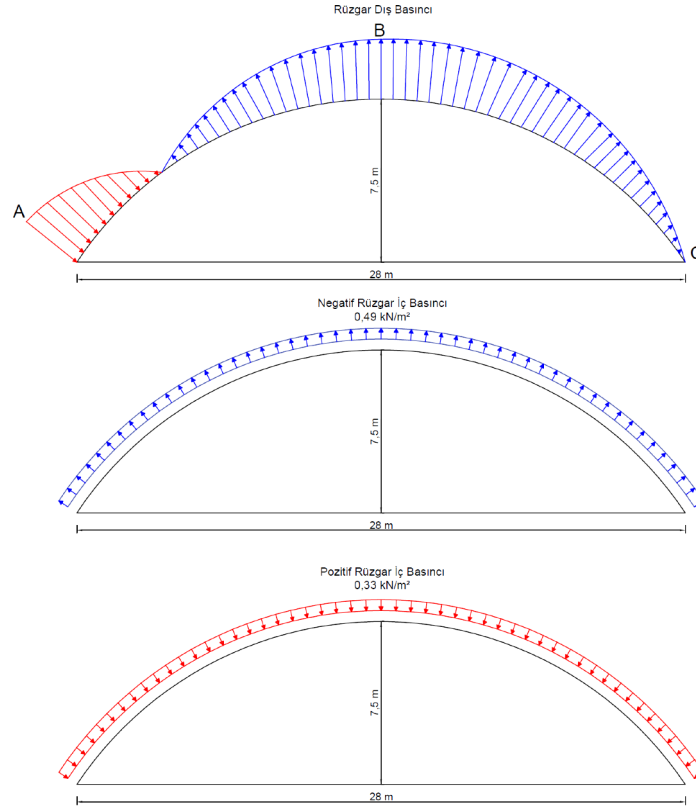
sağlamak amacıyla dikkate alınır. Özellikle cam kaplama elemanları için yük hesaplamaları özenle yapılır. Camın kalınlığına bağlı olarak, cam yüzeyine binen kütleli yük hesaplanır. Lamine camın özellikleri, birim hacim ağırlığı ve kalınlığına göre belirlenen cam yükü hesaplamada temel alınır. Ayrıca, yapıya ek olarak etki eden hizmet yükleri, kullanım amacına bağlı olarak hesaplara dahil edilir. Örneğin, mekanik tesisat yükleri veya geçici yükler bu kategoride yer alabilir. Model için hesaplanan sabit yük  $0,35 \text{ kN/m}^2$  olarak hesaplanmıştır ayrıca olası bir ek servis yükü için de  $0,15 \text{ kN/m}^2$  sağlanarak toplam sabit yük  $0,5 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Kubbe şeklindeki çatılarda; kirli yüzeyin temizlenmesi, tesisat arızalarının onarımı veya rutin bakım gibi faaliyetler sırasında oluşabilecek dinamik yükler söz konusu olabilir. TS 498 standartına göre, böyle çatılar için hareketli yük değeri  $1.5 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Ancak tasarım aşamasında, rüzgâr ve kar gibi etkenlerle aynı anda etki etme olasılığı oldukça düşük görüldüğünden, bu dinamik yüklerle birlikte rüzgâr ve kar yükleri ele alınmamıştır. Tasarım, bu yükleri ayrı ayrı ele alarak gerçekleştirilir ve bu yaklaşım, tasarımın pratik ve güvenli olmasını sağlamak amacıyla benimsenir.

2. Kar Yükü: Yapının dayanıklılığını belirlemek adına önemli bir yük türü olan kar yükü, TS EN 1991-1-3 standardına uygun olarak hesaplanır. Bu hesaplamalarda coğrafi konum ve rakım gibi faktörler göz önünde bulundurulur. Kar birikimi, yapı üzerinde asimetric ve simetric dağılımlar şeklinde olabilir. Bu farklı dağılım türleri, kar yükü hesaplamalarında büyük bir öneme sahiptir. Kar yükü hesaplamaları sırasında ilk olarak kar yükü şekil katsayıları belirlenir. Bu katsayılar, kar birikiminin dağılımına ve kubbe şekline bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Şekil katsayıları, kar yükünün yapının üzerindeki dağılımını ve etkisini açıklamak için kullanılır. Kar yükü; birikmemiş tam kar yükü ve birikmiş yarım kar yükü olmak üzere iki farklı yük kombinasyonuna etki eder. Bu yük kombinasyonları, kar birikiminin durumuna bağlı olarak farklı şekillerde yapının davranışını etkiler. Diyarbakır ili istatistik tablosu kullanılarak kar yükü hesaplaması yapılmıştır. Bu tabloya göre, en yüksek kar kalınlığına sahip olan durum baz alınarak zemin kar yükü değeri  $1,3 \text{ kN/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Daha sonra, kar yükü şekil katsayısı modeline göre hesaplanarak, bu değer zemin kar yüküyle çarpılarak elde edilir. Bu sayede, çatı üzerindeki kar yükü hesaplanmış olur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, birikmemiş kar yükü değeri  $1,04 \text{ kN/m}^2$  olarak bulunurken, birikmiş kar yükü hesabı Şekil 5'te gösterildiği şekilde hesaplanır. Daha sonra hesaplama kolaylığı için şekil katsayıları kullanılarak tekrar hesaplanmıştır. Bu yöntemle çatı üzerindeki kar yükü değerleri hesaplanmış olur. Kar yükü dağılımının gösterildiği bu çizimde, kar yükünün yapının üzerinde nasıl dağıldığı ve hangi bölgelerde yoğunlaştığı detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bilgiler, yapı analizlerinde kar yükünün etkisini daha iyi anlamak ve yapının dayanıklılığını doğru bir şekilde değerlendirmek için önemlidir.
3. Rüzgâr Yükü: Rüzgâr yükü, yapısal tasarım hesaplamalarında büyük bir öneme sahip olan karakteristik bir yük türüdür. Rüzgârın yapılar etkisinin hesaplanmasında, TS EN 1991-1-4 standart belgesinde yer alan parametreler ve faktörler kullanılır. Bu standart kılavuz, rüzgârın yapılar olan etkilerini belirleme ve yapıların rüzgâra karşı dayanıklılığını analiz etme süreçlerini yönlendirir. Bu yük türü, ortalama rüzgâr hızı ve diğer değişkenler temel alınarak hesaplanır. Hesaplamalar sırasında, engebelik katsayısı, orografi katsayısı ve diğer önemli parametreler titizlikle göz önünde bulundurulur. Rüzgâr yükü, dış ve iç basınç kuvvetleri olarak iki ana bileşene ayrılır. Dış basınç kuvveti, rüzgârın yapının dış yüzeyine çarpması sonucu oluşan basınç ve emme kuvvetlerini içerir. İç basınç kuvveti ise, rüzgârın kapalı olmayan yapıların içine girmesiyle meydana gelen basınç etkisini ifade eder. Rüzgâr yükü hesaplamaları, yapıya etki eden rüzgâr basınçlarını belirlemek amacıyla yapılan kritik hesaplamalardır. Bu hesaplamalarda kubbenin geometrik yapısına göre belirlenen basınç katsayıları büyük bir rol oynar. Bu katsayılar, yapının farklı noktalarında meydana gelen basınç farklarını ifade eder ve bu farklar, kubbenin şeklinden kaynaklanır. Elde edilen basınç katsayıları ile birlikte bölgesel rüzgâr dış basıncı hesaplamaları gerçekleştirilir. Kubbenin geometrisine bağlı olarak belirlenen basınç katsayıları, yapı üzerindeki rüzgâr etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde açıklar.



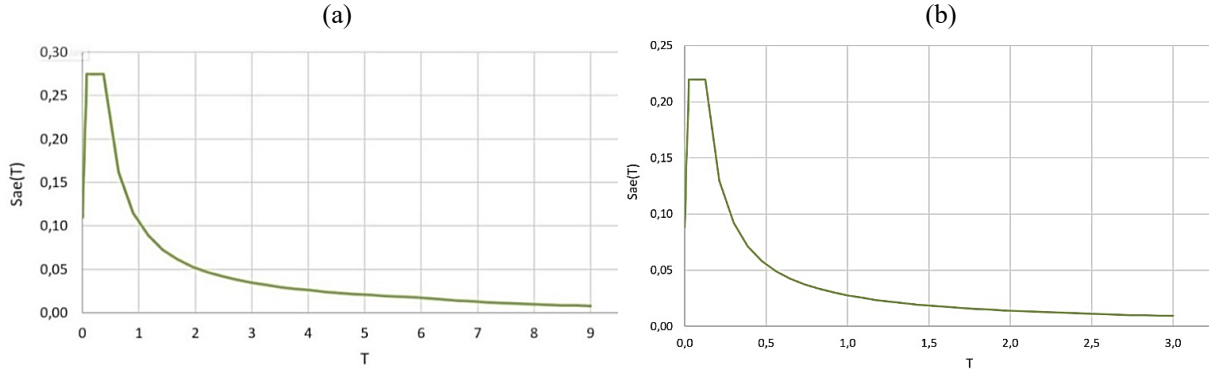
Şekil 5. Model için Durum (i) birikmemiş kar yükü ve durum (ii) birikmiş kar yükü dağılımı [17]

Özellikle n, tepe ve arka noktalarda oluşan basınç farklarını ifade eder ve bu da yapının dayanıklılığını anlamak için kritik öneme sahiptir. Hesaplanan basınç katsayılarıyla birlikte, bölgesel rüzgâr dış basınçları tespit edilir. Rüzgâr yükü hesaplamaları bazen karmaşık yapılarda daha da karmaşık hale gelebilir. Özellikle ift eğrilikli küresel sistemler gibi yapılarda, hesaplama süreci daha fazla dikkat ve zen gerektirebilir. Bu tür durumlarda, rüzgâr dağılımını belirlemek için önceden formüller kullanmak veya rüzgâr tüneli testleri gerçekleştirmek önemlidir. Literatürde, kubbe Şeklindeki yapılar için rüzgâr yüklerini hesaplamak amacıyla çeşitli yöntemler ve öneriler bulunmaktadır. Rüzgâr tüneli testleri gerçek dünya koşullarını taklit edebilse de prototip yapının rüzgâr tünelinde oluşan rüzgâr profili ve türbülans değerleri ile uyumu karmaşık olabilir. Bunun yanı sıra, akışkanın viskozitesinden kaynaklanan sınır tabakası etkileşimi, kubbenin yüzeyindeki basınç ve emme katsayılarını da etkileyebilir. Rüzgâr yükleri, yapıya dıŐarıdan etki eder ve tamamen kapalı yapılar için dış basınç kuvveti oluştururken, açık veya kısmen kapalı yapılar için i basınç kuvvetini de içerir. Diyarbakır ilindeki rüzgâr hızı istatistik raporu, ortalama rüzgâr hızını ve mevsim ile yn faktörlerini kullanarak esas rüzgâr hızını 35 m/sn olarak belirlemektedir. Bu esas rüzgâr hızı, sonrasında rüzgâr basınının hesaplanmasında kullanılır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen tepe hız kaynaklı rüzgâr basını, yapı geometrisine göre değişen basınç katsayılarıyla çarpılarak kubbenin bölgesel rüzgâr basını hesaplanır. Bu adımlar sayesinde, kubbenin rüzgâr etkisine maruz kalan bölgelerindeki basınç değerleri, yapı Şekline ve konumuna bağlı olarak dikkate alınarak belirlenmiş olur. Rüzgâr yükünün kubbe modeline olan etkisi, yük dağılımını gösteren Şekil 6'da ayrıntılı bir Şekilde açıklanmıştır. Bu dağılım, yapının rüzgâr yükü altındaki davranışını daha iyi anlamak için önemlidir.



Şekil 6. Model için kubbe üzerindeki rüzgâr dağılımları [17]

4. Deprem Yüğü: Uzay kafes sistemleri, yapısal hafifliği sayesinde diğer yapı sistemlerine kıyasla deprem yükü altında daha az etkilenme eğilimindedir. Bu nedenle, Dicle Üniversitesi arazisi için uzay kafes sistemi tercih edilmiştir. Deprem yükünün hesaplanmasında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) gereklilikleri titizlikle göz önünde bulundurulmuştur. Yerel zemin sınıfı "ZB" olarak belirlenmiştir. Spektral ivme katsayıları, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nın (AFAD) interaktif web haritası üzerinden elde edilmiştir. Bu tasarım spektral ivme katsayıları, deprem yükünün etkisini doğru bir şekilde temsil etmek amacıyla hesaplamalara dahil edilmiştir. Yatay elastik tasarım spektrumu ve düşey elastik tasarım spektrumu grafikleri kullanılarak, yerçekimi ivmelerinin deprem yükü hesaplamalarında nasıl etki edeceği detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bina kullanım sınıfı, deprem tasarım sınıfı ve yapı yüksekliği sınıfı gibi önemli parametrelerin tespiti titizlikle gerçekleştirilmiştir. Proje sahası için, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı'nda (AFAD) bulunan interaktif web haritası kullanılarak spektral ivme katsayıları tespit edilmiştir. Bu değerler boyutsuz olarak ifade edilmiş olup,  $S_s$  değeri 0,305 ve  $S_1$  değeri 0,129 olarak belirlenmiştir. Yerel zemin sınıfı ve spektral ivme katsayılarına bağlı olarak yerel zemin katsayıları hesaplanmıştır. Daha sonra tasarım ivme katsayıları hesaplanmıştır:  $S_{DS}$  değeri 0,275 ve  $S_{D1}$  değeri 0,103 olarak bulunmuştur. Bu hesaplanan değerler, yapının titreşim periyotları kullanılarak Şekil 7'de gösterilen yatay elastik tasarım spektrumu ile düşey eksen tasarım spektrum ivmelerinin oluşturulmasını sağlamıştır.



Şekil 7. (a) Yatay elastik tasarım spektrumu, (b) Düşey elastik tasarım spektrumu [17]

5. Sıcaklık Yüğü: Uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değışimlerine bağlı olarak meydana gelen genleşme ve büzölme, gerilmelere neden olabilir. Bu gerilmeler, çubuk ve düğüm noktalarında farklılık gösterir ve ek yüklerin ortaya çıkmasına yol açar. Sıcaklık değışikliği  $\pm 20^{\circ}\text{C}$  olarak kabul edilmiştir; bu, tipik bir sıcaklık dalgalanması değeridir ve çelik elemanların genleşmesi ve büzölmesi için kullanılan bir referanstır. Sıcaklık etkisi, yapıya özđü bir yük olarak kabul edilir ve yük kombinasyonları içinde yer almaz. Bu durumun sebebi, sıcaklık yükünün sistem üzerinde kritik bir etkiye sahip olmamasıdır. Sıcaklık yükleri, elemanların gerilme davranışını modellenirken kullanılır. Örneğin, çelik elemanların uzunlamasına gerilmesi ve büzölmesi nedeniyle meydana gelen gerilmeler bu hesaplamalarda ele alınır. Sıcaklık yüklerinin karakteristik olarak analiz edilmesi, sistemin sıcaklık değışikliklerine nasıl tepki vereceğini anlamak için önemlidir. Bu şekilde, elemanların sıcaklık değışikliklerine karşı nasıl davrandığı ve bunun yapının genel davranışına etkisi daha iyi anlaşılabilir. Sonuç olarak, sıcaklık yükleri uzak kafes sistemlerinde çelik elemanların sıcaklık değışimlerine bağlı olarak oluşan gerilmeleri ifade eder. Bu gerilmeler, ek bir yük olarak ele alınır ve yapının genel davranışını nasıl etkilediği titizlikle incelenir. Ancak, bu model bağlamında, diğer yük türleri ile kıyaslandığında sıcaklık yükünün önemi daha düşük düzeydedir dolayısıyla yük kombinasyonlarında dikkate alınmamıştır.

Hesaplanan yükler sonucunda, ÇYTHYE-2018'e göre YDKT'ye göre oluşturulmuştur. Bu kombinasyonlar, her yükün farklı yönlerden alındığı aynı kombinasyon içinde sunulmuştur. Ana yük kombinasyonları aşığıdaki gibidir. Ana yük kombinasyonlarından elde farklı yük yönlerine göre kombine edilen toplam 40 sistem kombinasyonu oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, en kritik yükün belirlenmesine olanak tanımaktadır.

- 1.4G
- 1.2G+1.6S+0.8W
- 1.2G+Q+0.5S+1.6W
- 1.2G+Q+0.2S+ E
- 0.9G+1.6W
- 0.9G+E

Burada;

“G” sabit yük, “Q” hareketli yük, “S” kar yükü, “W” rüzgâr yükü, “E” deprem etkisidir

### 3. Analiz Sonuçları

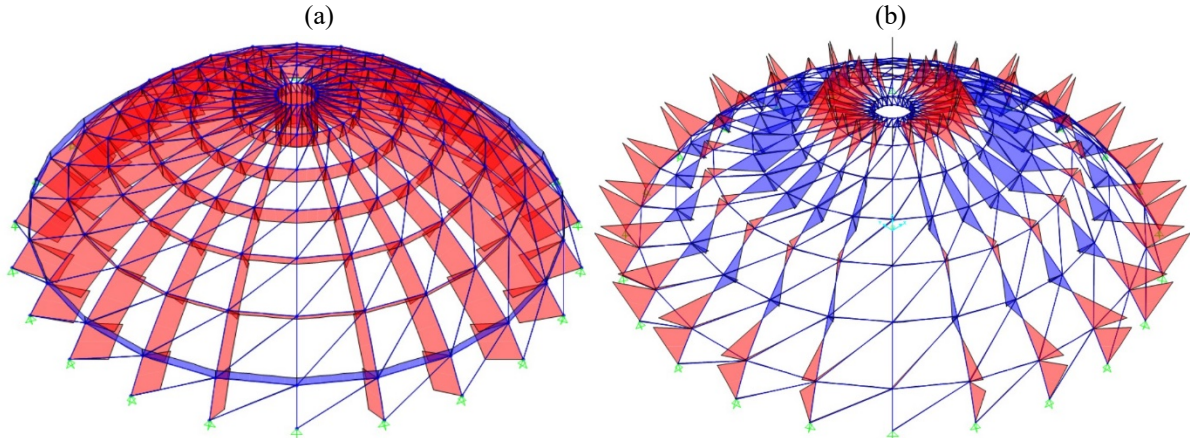
#### 3.1. Kubbe elemanları eksenel gerilme değerleri

Model, SAP2000 programı kullanılarak ayrıntılı bir analize ve tasarıma tabi tutulmuştur. Yapının elemanlarının tasarımında AISC 360-10 yönetmeliğine uygun olarak LRFD (Load and Resistance Factor Design) yük bileşimleri kullanılmıştır. Bu çerçevede, moment ve eksenel yük diyagramları Model'in tek katmanlı ve çubuk birleşim elemanlarından oluştuğunu ve moment aktaran birleşim elemanları olduğunu göz önünde bulundurarak elde edilmiştir. Bu elemanların birleşim bölgelerinde moment değerleri ve eksenel yük gerilmelerinin yanı sıra burulma gerilmeleri de dikkate alınmıştır. Model'in birleşim elemanlarının yapısından kaynaklanan moment etkisi ve eksenel yük gerilmeleri, analizin odak noktalarını oluşturur. Ayrıca, radyal ve çember kirişler arasında farklı

gerilme değerleri ve davranışlarının olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Bu nedenle, analiz sonuçları bu farklılıkları titizlikle ele almıştır.

Çubukların kendi öz ağırlığı, kaplama yükleri ve ek servis yükleri sonucunda oluşan ağırlık, yapı üzerinde eksenel yüklerin dağılımını şekillendirmektedir. Şekil 8(a)'da gösterildiği gibi, bu eksenel yüklerin dağılımı örneklenmiştir. Model, tek katmanlı bir yapıya sahip olup, tüm yay kirişler bu eksenel yükler altında bulunmaktadır. Paralel çemberlerde ise, etek kısmındaki çemberde çekme gerilmesi oluşurken diğer çemberlerde basınç gerilmesi meydana gelmektedir. Yay kirişlerinde, en büyük basınç kuvveti etek bölümünde oluşmaktadır ve bu kuvvetin değeri 26,59 kN olarak belirlenmiştir. Paralel çemberlerde ise, en yüksek basınç gerilmesi tepe çemberinde görülmekte ve bu gerilme değeri 25,55 kN olarak hesaplanmıştır. Diğer bir yandan, çekme gerilmesi olan etek çemberinin eksenel gerilmesi ise 4,54 kN olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, yapının farklı bölgelerindeki çubuklara etki eden eksenel gerilmeleri ve bu gerilmelerin yoğunluklarını göstermektedir. Paralel çemberlerdeki farklı gerilme yönelimleri, yapısal elemanların farklı konumlarına bağlı olarak nasıl değişebileceğine işaret etmektedir. Bu bilgiler, yapısal analiz ve tasarım süreçlerinde elemanların taşıma kapasitesini ve güvenliğini belirlemede önemli bir role sahiptir.

Kubbe üzerinde kar yükünün homojen bir şekilde dağıtılarak her alana etki etmesi, moment dağılımını belirgin bir şekilde etkilemektedir. Şekil 8(b)'de sunulduğu gibi, bu dağılım sonucunda moment diyagramı oluşmuştur. Bu moment diyagramı incelendiğinde, sistem üzerinde oluşan maksimum moment değerleri de görülebilmektedir. Pozitif yönde en büyük moment değeri 0,46 kN.m olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde, negatif yönde de maksimum moment değeri -0,8 kN.m olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, kar yükünün homojen bir şekilde kubbe üzerine dağıtılması sonucunda oluşan moment dağılımını göstermektedir. Pozitif ve negatif moment değerleri, kubbenin farklı bölgelerinde nasıl etkilendiğini ve moment dağılımının nasıl şekillendiğini açıkça yansıtmaktadır. Bu bilgiler, yapısal analiz süreçlerinde kubbenin taşıma kapasitesini ve yapısal bütünlüğünü değerlendirmede önemli bir rol oynamaktadır.



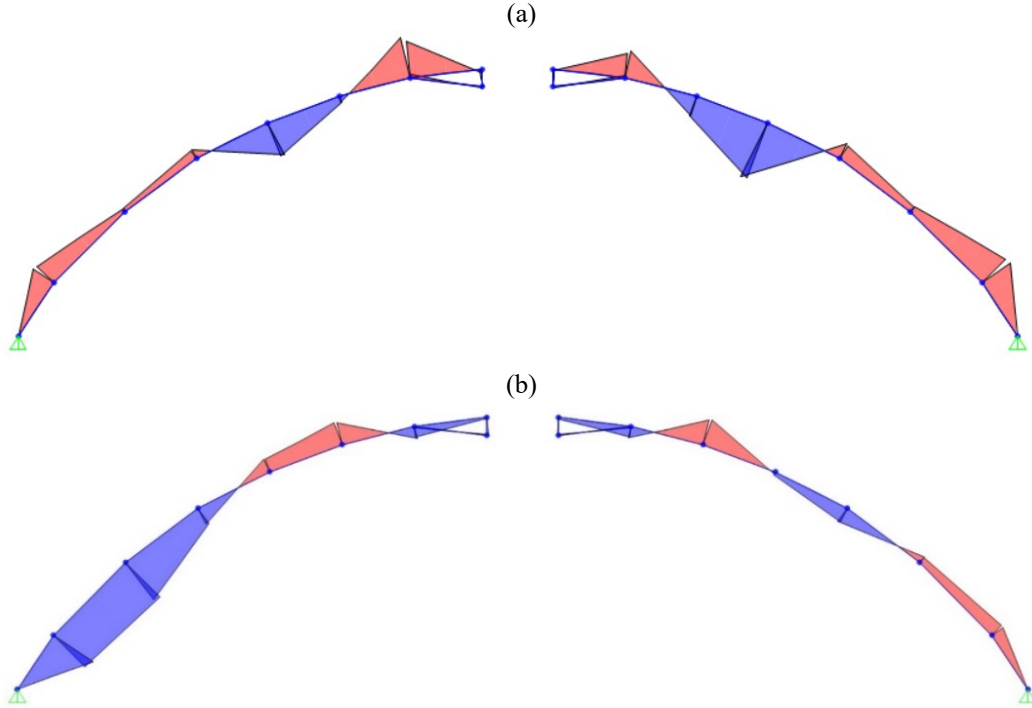
**Şekil 8.** Karakteristik yükler altında gerilme diyagramları; (a) Sabit yük altında kubbe sisteminde oluşan eksenel yük diyagramı, (b) Tam kar yükü altında kubbe sisteminde oluşan moment diyagramı [17]

Yarım kar yükü, kubbenin yüzeyinde eşit bir dağılıma sahip olmayan bir yük şeklidir. Bu durum, hem yereldeki hem de geneldeki burkulmaya neden olabileceği için sonuçları oldukça kritiktir. Şekil 9(a)'da gösterildiği gibi, kiriş üzerinde yarım kar yükü etkisiyle oluşan moment dağılımı incelendiğinde, pozitif yönde maksimum moment değeri 1,66 kN.m ve negatif yönde maksimum moment değeri ise 1,13 kN.m olarak tespit edilmiştir. Kubbe tasarımında kullanılan diyagonal elemanlar, kubbenin stabilitesini sağlamak için önemli bir rol oynamaktadır. Bu elemanlar, çelik yapıdaki düzlemsel yüzeylere yüklerin daha homojen bir şekilde dağılmasını temin ederler. Bu sayede, yapının herhangi bir yönde eğilmeden daha sağlam bir şekilde durabilmesi mümkün olur. Özellikle eşit dağılmamış yüklenme durumunda, bu diyagonal elemanlar bölgesel olarak hem çekme hem de basınç gerilmesine maruz kalabilirler. Ayrıca kubbe modeli yarım kar yüküne maruz kaldığında, diyagonal elemanlar bölgesel olarak eksenel çekme ve basınç gerilmelerine maruz kalarak yapıya dayanıklılığını artırır ve ek bir stabilite sağlar. Bu durum, yapıya yarım kar yükü gibi dengesiz yüklemelerin etkilerine karşı daha güçlü bir direnç kazandırdığı için oldukça önemlidir.



DıŐ rüzgâr yűkű, kubbenin dıŐ yűzeyinde oluŐturduđu basınç ve vakum etkilerine bađlı olarak gerilmelere maruz kalır. Őekil 9(b)'de X yűnűnden gelen dıŐ rüzgâr yűkűnűn kubbe kiriŐinde oluŐturduđu moment diyagramı gűrűlmektedir. Bu yűkűn etkisiyle kubbe kiriŐinde meydana gelen moment dađılımı analiz edilmiŐtir. Sonuçlar, bu yűkűn kubbe kiriŐi űzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Bu yűk sonucunda, kubbe kiriŐinde pozitif yűnde en bűyűk moment deđerı 0,68 kN.m olarak belirlenmiŐtir. Aynı Őekilde, negatif yűnde en bűyűk moment deđerı ise 0,36 kN.m olarak hesaplanmıŐtır. Sađ kar yűklemesi gibi, bu dıŐ rüzgâr yűklemesi de kubbe yűzeyindeki yűk dađılımını asimetrik bir Őekilde oluŐturduđu için, kubbe burkulmasında kritik deđerlerin oluŐmasına neden olabilir.

Bu bilgiler, dıŐ rüzgâr yűkűnűn kubbe űzerindeki etkilerini ve yapıya nasıl bir etki yaptığını gűstermektedir. Asimetrik yűk dađılımının, kubbe burkulmasında nasıl kritik deđerler oluŐturabileceğini anlamak, yapısal analiz ve tasarım sűreçlerinde űnemli bir adımdır. Bu tűr etkilerin deđerlendirilmesi, yapısal bűtűnlűđűn korunması ve gűvenliđin sađlanması açısından bűyűk bir rol oynamaktadır.



**Őekil 9.** Karakteristik yűkler altında gerilme diyagramları; (a) Yarım kar (sađ) yűkű altında kubbe sisteminde oluŐan moment diyagramı, (b) DıŐ rüzgâr yűkű altında kubbe sisteminde oluŐan moment diyagramı [17]

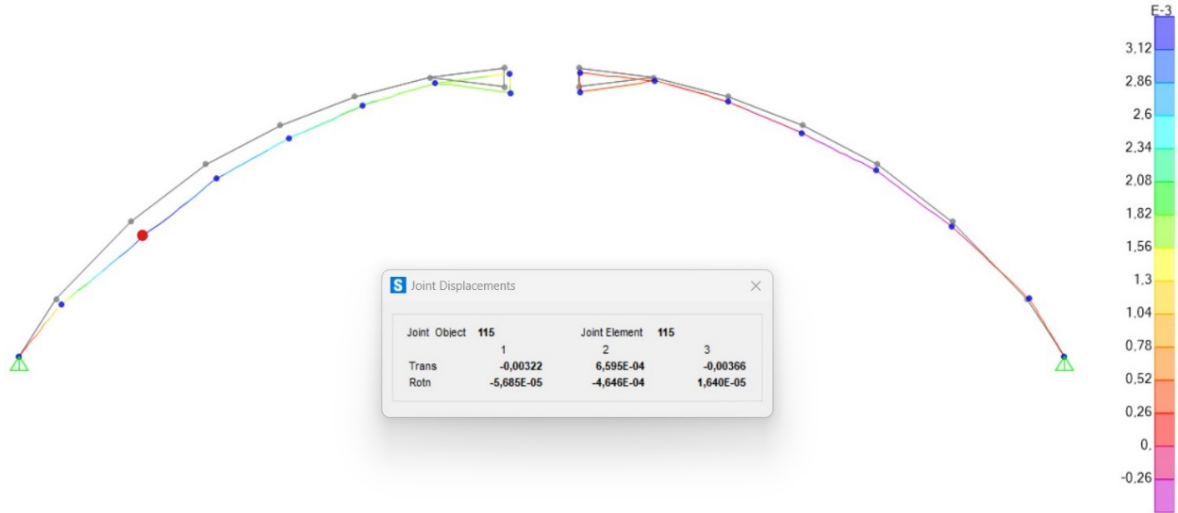
### 3.2. Kubbe Deplasman Sınır Kontrolű

DűŐey yer deđiŐtirme durumu, yapısal bűtűnlűđűn ve dayanıklılıđının deđerlendirilmesi açısından űnemlidir. DűŐey ekseninde meydana gelen yer deđiŐtirmeler, çeŐitli kombinasyonlar kullanılarak kontrol edilmiŐ ve maksimum yer deđiŐtirme sınırı belirlenmiŐtir. ÇYTHYE-2018 madde 15.2'ye gűre, dűŐey yer deđiŐtirmenin açıklıđa oranı 1/300 sınırını aŐmamalıdır. Model űzerinde gerçekteŐirilen analizler sonucunda elde edilen en bűyűk dűŐey yer deđiŐtirmesi  $G+0,5Q+W_1$  kombinasyonunda 3,72 mm olarak hesaplanmıŐtır. Bu deđer, belirtilen sınır uzunluđu olan 93 mm'yi aŐmadığını gűstermektedir. Bu sonuçlar, yapı űzerinde meydana gelen dűŐey yer deđiŐtirmelerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduđunu ortaya koymaktadır.



Şekil 10. Düşey yer değiştirme kontrolünün  $G+0,5Q+W_1$  yük kombinasyonu altında deplasmanı [17]

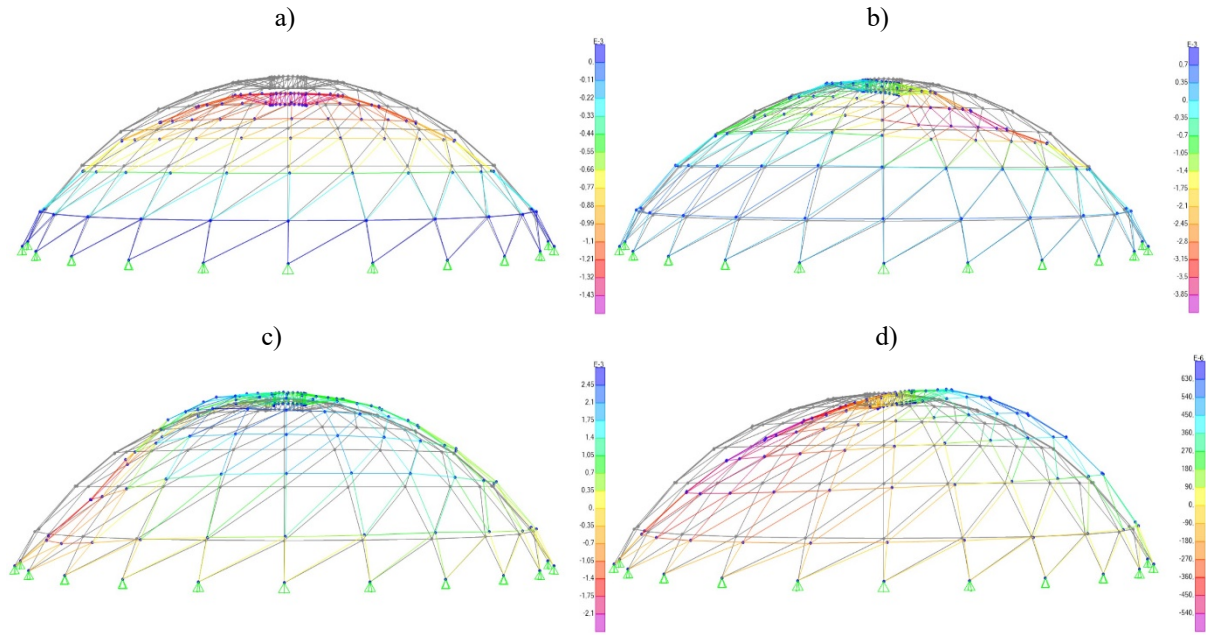
Düşey yer değiştirme sınır durumunun daha açık bir şekilde anlaşılması için şekil 7'de gösterilen deplasman durumu incelenebilir. Bu şekil, yapısal analiz sonuçlarına görsel bir bakış sunarak düşey yer değiştirme sınırlarını daha iyi anlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu bilgiler, yapısal güvenliği ve dayanıklılığı değerlendirmede önemli bir rol oynar ve yapı üzerindeki düşey yer değiştirmelerin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu teyit etmektedir.



Şekil 11. Yatay yer değiştirme kontrolünün  $G+0,5Q+W_1$  yük kombinasyonu altında deplasmanı [17]

Yapı üzerindeki yatay yer değiştirme durumu, yapısal bütünlüğün ve dayanıklılığın değerlendirilmesinde kritik bir faktördür. Bu nedenle, yer değiştirmenin kontrolü çeşitli kombinasyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiş ve maksimum yer değiştirme sınırı belirlenmiştir. ÇYTHYE-2018 madde 15.3'e göre, yapının cephe kaplaması ve türüne bağlı olarak yatay yer değiştirmenin belirli bir sınıra sahip olması gerekmektedir. Model üzerinde yapılan analizler sonucunda yatay yer değiştirmeleri incelenmiş ve bu yer değiştirmelerin belirlenen sınırlar içinde olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonuçları, yapı üzerinde meydana gelen yatay yer değiştirmelerin, kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermektedir. Yatay yer değiştirme sınır durumunun daha açık bir şekilde anlaşılması için şekil 8'de gösterilen deplasman durumu incelenebilir. Bu şekil, yatay yer değiştirmeleri ve sınırlarını görsel olarak sunarak yapı üzerindeki yatay yer değişiminin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu teyit etmektedir. Yatay yer değişiminin kontrolü, yapısal güvenliği ve dayanıklılığı sağlamada önemli bir adımdır ve analiz sonuçları bu konuda yapıya olan güveni artırmaktadır.

Farklı karakteristik yükler altında düğüm noktalarının düşey yer değiştirmeleri, yapısal analizin önemli bir bileşeni oluşturur. Bu nedenle, çeşitli karakteristik yükler altında meydana gelen düşey yer değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analiz sonuçları, bu değişimleri daha iyi anlamak ve yapısal bütünlüğü değerlendirmek amacıyla renk skalası kullanılarak düşey yer değiştirmeleri Şekil 11 'de görselleştirilmiştir. Her karakteristik yük durumu altında, düğüm noktalarının düşey yönde olan yer değiştirmeleri farklı olabilir. Bu değişimler, yapı üzerindeki yük dağılımına, geometriye ve diğer etmenlere bağlı olarak değişebilir. Düşey yer değiştirmeleri, renk skalası kullanılarak farklı renk tonlarıyla ifade edilmiştir. Bu görselleştirme yöntemi, farklı düşey yer değiştirme seviyelerini kolayca ayırt etmemize ve analiz sonuçlarını daha net anlamamıza yardımcı olur. Bu analiz sonuçları, yapı üzerindeki düşey yer değişimlerinin karakteristik yükler altında nasıl değiştiğini ve hangi bölgelerde daha büyük yer değişimlerinin meydana geldiğini göstermektedir. Bu bilgiler, yapısal tasarımın ve dayanıklılığın değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar ve yapı üzerindeki yer değişimlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde olduğunu göstermek için kullanılır.



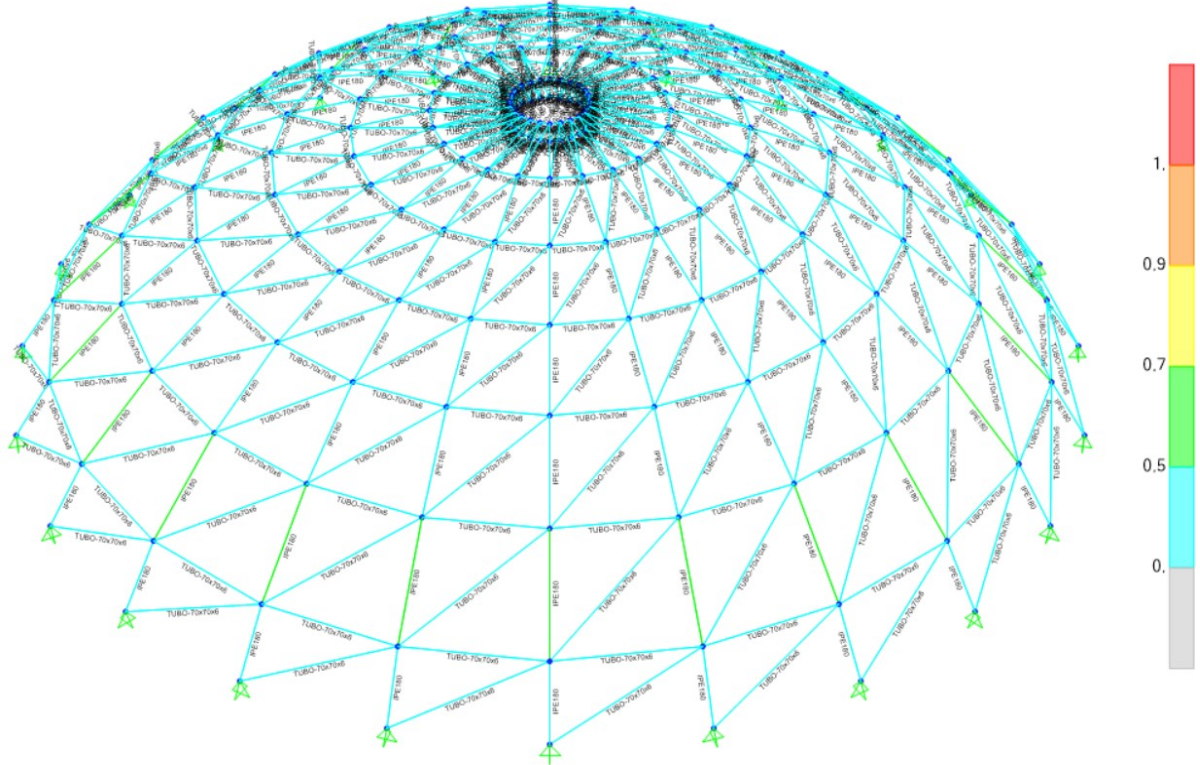
**Şekil 12.** Karakteristik yükler etkisi altında deplasman durumu; (a) Sabit yük, (b) yarım sağ kar yükü, (c) dış yatay rüzgâr yükü, (d) deprem yükü [17]

Sonuç olarak, Model'in hem düşey hem de yatay yer değiştirmeleri, belirlenen tasarım sınırlamalarını aşmayacak şekilde titizlikle kontrol edilmiştir. Bu analiz sonuçları, yapısal hesaplamaların doğruluğunu ve güvenilirliğini yansıtmaktadır. Ayrıca, çelik elemanların boyutlandırılmasında rehberlik sağlayan önemli verileri içermektedir. Yapının bütünlüğü ve dayanıklılığı açısından önemli olan düşey ve yatay yer değiştirmelerinin sınırlar içinde olduğunun tespit edilmesi, yapıya güvenli bir şekilde hizmet edebileceğini teyit eder.

### 3.3. Kubbe Elemanları Tasarım Sonuçları

Tek katmanlı kubbe sistemi tasarımında, çubuk elemanlar üzerinde meydana gelen gerilme değerleri temel alınarak SAP2000 programıyla optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon sayesinde çubuk kesitleri belirlenmiş ve tasarım süreci optimize edilmiştir. Bu süreçte, çubuk elemanların üzerindeki gerilme değerleri ve burkulma davranışı dikkate alınarak kesit seçimi yapılmıştır. Şekil 13'te çubuk elemanların Etki/Kapasite oranlarını renk skalasıyla göstererek sunmaktadır. Yapılan YDKT yöntemine uygun tasarım sonucunda, tüm meridyen kiriş elemanları IPE-180 profilini kullanacak şekilde belirlenmiştir. Aynı şekilde, çember, diyagonal ve alt kiriş elemanları TUBO-70x70x6 kutu kesiti olarak tasarlanmıştır. Tasarım süreci, imalat, nakliye ve montaj aşamalarında kolaylık sağlamak ve hatalı işlemlerin önüne geçmek amacıyla her çubuğun aynı kesitte tasarlanmasını içermektedir.

Bu optimizasyon sonuçları, çubuk elemanlarının uygun kesitlerle boyutlandırılmasıyla yapısal dayanıklılığın ve güvenliğin sağlanması hedeflenmiştir. Ayrıca, tüm çubukların aynı kesitte olması imalat ve montaj süreçlerini basitleştirerek daha etkili bir uygulama sağlamayı amaçlamaktadır. Bu tür optimizasyonlar, yapı mühendisliği tasarımının pratik ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine katkıda bulunur.



Şekil 13. YDKT'ye göre tasarımı yapılmış ve etki/kapasite oranına göre renklendirilmiş model görüntüsü [17]

Kubbenin en kritik çubuğu olarak kabul edilen ve etek bölümünde yer alan meridyen kiriş elemanının tasarım detayları, Şekil 14'te sunulmuştur. Bu elemanın tasarımı, hem eksenel basınç hem de moment etkileri altında gerçekleştirilmiştir. Tasarım süreci, ilgili yönetmeliğin belirlediği kurallara tam uygunluk sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Elemanın eksenel basınç etkisi altında taşıma kapasitesi, ilgili hesaplamalar ve yönetmelik kuralları temel alınarak belirlenmiştir. Aynı şekilde, elemanın moment etkisi altındaki davranışı da yönetmeliğin ilgili bölümlerine göre hesaplanmıştır. Hem eksenel basınç hem de moment etkilerinin birleşik etkisi, elemanın dayanıklılığını ve taşıma kapasitesini belirlemede önemli bir rol oynamıştır. Tasarım süreci, yönetmelikte belirtilen güvenlik faktörleri ve tasarım kriterlerine göre gerçekleştirilmiştir. Elemanın malzeme özellikleri, boyutları ve taşıma kapasitesi, bu yönetmelik kuralları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Tasarımın sonucunda elde edilen eleman boyutları, eksenel basınç ve moment etkilerine karşı yeterli dayanıklılığı sağlayacak şekilde seçilmiştir.

```

AISC 360-10 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame : 319      X Mid: -12,      Combo: 1.2G 1.6Q_0,5SL Design Type: Brace
Length: 2,828   Y Mid: 0,      Shape: IPE180      Frame Type: SCBF
Loc : 2,828     Z Mid: 2,5      Class: Compact     Princpl Rot: 0, degrees

Provision: LRFD      Analysis: Direct Analysis
D/C Limit=1,      2nd Order: General 2nd Order      Reduction: Tau-b Fixed
AlphaPr/Py=0,138  AlphaPr/Pe=0,449  Tau_b=1,      EA factor=0,8      EI factor=0,8

PhiB=0,9      PhiC=0,85      PhiTY=0,9      PhiTF=0,75
PhiS=0,9      PhiS-RI=1,      PhiST=0,75

A=0,002      I33=1,317E-05      r33=0,074      S33=1,463E-04      Av3=0,001
J=0,      I22=1,010E-06      r22=0,021      S22=2,220E-05      Av2=9,540E-04
E=210000000,  Fy=355000,      Ry=1,1      z33=1,660E-04      Cw=0,
RLLF=1,      Fu=510000,      z22=3,460E-05

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo 1.2G_1.6Q_0,5SL)
Location      Pu      Mu33      Mu22      Vu2      Vu3      Tu
2,828      -117,445      -2,883      -0,052      1,714      0,034      5,414E-05

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)
D/C Ratio: 0,655 = 0,602 + 0,048 + 0,004
= (Pr/Pc) + (8/9) (Mr33/Mc33) + (8/9) (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)
Factor      L      K1      K2      B1      B2      Cm
Major Bending      1,      1,      1,      1,      1,      1,
Minor Bending      1,      1,      1,      1,      1,      0,255

LTB      Lltb      Kltb      Cb
1,      1,      2,252

Pu      phi*Pnc      phi*Pnt
Force      Capacity      Capacity
Axial      -117,445      195,06      763,605

Mu      phi*Mn      phi*Mn      phi*Mn
Moment      Capacity      No LTB      Cb=1
Major Moment      -2,883      53,037      53,037      34,133
Minor Moment      -0,052      11,055

SHEAR CHECK
Status      Vu      phi*Vn      Stress
Major Shear      1,714      203,202      Force      Capacity      Ratio      Check
Minor Shear      0,034      279,115      0,008      OK      OK

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS
P      P
Comp      Tens
Axial      -117,445      0,

```

Şekil 14. Kritik kesitin YDKT yöntemine göre tasarım detayları [17]

### 3.4. Kubbe modelinin ÇYTHYE-2018'e göre kontrol edilmesi

Yapısal analiz sonuçlarına göre, program çıktısının doğruluğunu ve güvenliğini sağlamak amacıyla, ÇYTHYE-2018'e uygun olarak matematiksel olarak gözden geçirilmiştir. Model sistemi için çeşitli kombinasyonlar altında meydana gelen basınç ve çekme gerilmeleri etkisi altında, en kritik çubuk elemanın dayanıklılığı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, ÇYTHYE-2018 kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İncelenen çubuk, Şekil 14'Te tanımlanan kritik basınç yükü altındaki meridyen giriş elemanıdır. Bu eleman, hem eksenel basınç yükü hem de iki eksen boyunca etki eden moment yükü gibi farklı yüklemelere maruz kalmaktadır.

### 3.5. Basınç kuvveti altındaki çubuğun tasarım kontrolü

#### 3.5.1. Yerel burkulma için enkesit sınıflandırılması

Eleman kesitlerinin aksel basınç gerilmesi altındaki davranışını değerlendirirken, yerel burkulma sınır koşulunun iki ayrı senaryoda incelenmesi gerekmektedir: narin enkesit durumu ile narin olmayan enkesit durumu. Yerel burkulma narinlik değeri,  $\lambda$  olarak adlandırılır ve bu değer, narinlik sınırı olan  $\lambda_r$  değerini aşmadığında kesitin "narin olmayan enkesit" olarak kabul edildiği, ancak aştığında kesitin "narin enkesit" olarak adlandırıldığı bir kriterdir.

Tasarım süreci sonucunda tercih edilen yaklaşım, çift simetrik eksenli IPE 180 profilinin başlık ve gövde bölümleri üzerine odaklanmıştır. Yerel burkulma kontrolü, denklem (1) ve (2)'nin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Başlık parçasının kontrolünde ise (Tablo 5.1A, Durum 1) koşulları dikkate alınmıştır. Bu koşullar, yapısal bütünlüğün sağlanması ve dayanıklılığın korunması amacıyla kesitin yerel burkulma davranışının kritik bir şekilde analiz edilmesini gerektirir.

$$\lambda = \frac{b}{2t_w} = \frac{45,5}{5,3} = 8,58 < \lambda_r = 0,56 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 13,62 \quad (1)$$

Gövde parçasının yerel burkulma davranışının analizi, (Tablo 5.1A, Durum 5) koşulları temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu koşulların gözetilmesi, kesitin yapısal bütünlüğünün sağlanması ve dayanıklılığının korunmasının amaçlandığı bir süreci ifade eder. Kesitin yerel burkulma davranışının titizlikle analiz edilmesi, potansiyel zayıf noktaların tespit edilmesi ve kesitin tasarımının güvenli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için büyük önem taşır. Bu sayede olası yüklemelerde kesitin yeterli performansı sağlanabilir ve yapısal sağlamlık korunabilir.

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{146}{5,3} = 27,55 < \lambda_r = 1,49 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1,49 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 36,24 \quad (2)$$

Verilen  $\lambda$  değeri  $\lambda_r$  değerini aşmadığından, yerel burkulma durumu "narin olmayan enkesit" olarak sınıflandırılmıştır. Bu sonuç, kesitin belirli yüklemelerde yerel burkulmaya karşı dayanıklı olduğunu göstermektedir. Yani, kesit yapısal bütünlüğünü ve dayanıklılığını korumak adına gereken kriterleri karşılamaktadır. Bu analiz, kesitin tasarım sürecinin güvenilirliği ve kesitin potansiyel zayıf noktalarının belirlenmesi açısından önemli bir adımdır.

#### 3.5.2. Narinlik oranı sınırı

Elemanların aksel basınç altında maruz kaldığı gerilmelere yönelik değerlendirmeler, çelik yönetmeliğinin Bölüm 6 veya Bölüm 16 hükümleri uyarınca burkulma boyu ( $L_c=KL$ ) kullanılarak yapılır. Bu hesaplamada, narinlik oranı  $L_c/i \leq 200$  değerini aşmamalıdır.

Seçilen IPE 180 profilinin burkulma mukavemet değerleri ise Tablo 1'de bulunmaktadır. Bu değerler, elemanın burkulma davranışını ve mukavemetini belirlemekte önemlidir. Dolayısıyla, elemanın tasarımında bu değerler göz önünde bulundurulmalıdır. Eğer hesaplanan  $L_c/i$  değeri 200'den küçükse, seçilen profil elemanın burkulma açısından güvenli bir performans sergilemesi beklenir. Bu analiz, yapısal sağlamlığın ve dayanıklılığın tasarım sürecinin temel bir parçasını oluşturur.

$$\lambda_x = L_{cx} / i_x = 2,828 / 0,0742 = 38,11 \leq 200 \quad (3)$$

$$\lambda_y = L_{cy} / i_y = 2,828 / 0,0206 = 137,28 \leq 200 \quad (4)$$

Narinlik oranı her iki eksen için de kritik değerinin altında olduğundan, yönetmeliğin 8.1.1 maddesine göre narinlik koşulu sağlanmıştır.

**Tablo 1.** IPE 180 profili ölçü ve mukavemet tablosu [20]

IPE 180			
	A	2390	mm <sup>2</sup>
	J	48100	mm <sup>4</sup>
	i <sub>x</sub>	74,2	mm
	i <sub>y</sub>	20,6	mm
	I <sub>x</sub>	13170000	mm <sup>4</sup>
	I <sub>y</sub>	1010000	mm <sup>4</sup>
	W <sub>px</sub>	166000	mm <sup>3</sup>
	W <sub>py</sub>	34600	mm <sup>3</sup>
	W <sub>ex</sub>	146000	mm <sup>3</sup>
	W <sub>ey</sub>	22200	mm <sup>3</sup>
	b	91	mm
	t <sub>f</sub>	8	mm
	t <sub>w</sub>	5,6	mm
	h	180	mm
h <sub>i</sub>	164	mm	
d	146	mm	

### 3.5.3 Karakteristik basınç kuvveti mukavemeti

Bu dayanım terimi, bir yapı elemanının eksenel basınç altında ne kadar yük taşıyabileceğini ifade eder. Elemanın narin olmayan kesiti için geçerli olan eksenel basınç kuvveti  $P_n$ , çelik yönetmeliğinin 8.2 maddesi dikkate alınarak hesaplanır.

Elemanın kritik yük sınırını tespit etmek için ise denklem (4) çözümlenir ve burkulma gerilmesi hesaplanır. Bu hesaplama, elemanın hangi yük seviyelerinde burkulmaya maruz kalabileceğini belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.

Gerilme hesaplamasında, narinlik oranı yüksek olan eksen yönündeki değer tercih edilir çünkü bu durumda eleman daha dayanıklı bir davranış sergileme eğilimindedir. Bu detaylı analizler, elemanın taşıma kapasitesini anlamak, tasarımın güvenliğini sağlamak ve yapısal bütünlüğü korumak için hayati bir rol oynar.

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot 21 \times 10^7}{\left(\frac{2,828}{2,06 \times 10^{-2}}\right)^2} = 109517,5 \text{ kN/m}^2 \quad (5)$$

Burkulma gerilmesi ve kritik yükün hesaplanmasında denklem (6) kullanılarak koşul durumu aşağıdaki şekilde belirlenir. Kritik burkulma gerilmesi, narinlik oranı yüksek olan eksenin hesaplamalarına dahil edilerek hesaplanır.

$$\frac{L_c}{i_y} = \frac{2,828}{2,06 \times 10^{-2}} = 137,6 > 4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 114,55 \quad (6)$$

Denklem (6)'nın koşullu çözümü sonucunda kritik burkulma gerilmesi  $F_{cr}$ , hesaplanır. Bu hesaplama, elemanın belirli bir yük altında burkulma davranışını ve dayanıklılığını değerlendirmek için önemlidir.

$$F_{cr} = 0,877 F_e = 0,877 (109517,5) = 96046,9 \text{ kN/m}^2 \quad (7)$$

Karakteristik basınç kuvveti  $P_n$ , hesaplanan kritik burkulma gerilmesine bağlı olarak çözümlenir. Yüksek Değişkenlik Katsayısı Yöntemi (YDKT) çerçevesinde, karakteristik basınç kuvveti tasarım katsayısı ( $\Phi_c = 0.90$ ) ile çarpılarak tasarım kuvveti elde edilir. Bu yöntem, yapı elemanlarının dayanıklılığını ve tasarımını değerlendirmede kullanılan bir yaklaşımdır.

$$P_n = F_{cr} A_g = 96046,9 \times 23,9 \times 10^{-4} = 229,55 \text{ kN}$$

$$P_d = \Phi_c P_n = 0,9 \times 229,55 = 206,6 \text{ kN bulunur.}$$

$$\frac{P_u}{P_d} = \frac{117,45}{206,6} = 0,57 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır.

### 3.6. Kesme kuvveti etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Çubuk eleman, kesme kuvvetine maruz kaldığında, taşıma kapasitesi azalır ve kırılma riski artar. Bu nedenle çelik kubbe sistemlerinin tasarımında, çubuk elemanların kesme kuvvetlerine karşı direncinin hesaplanması ve tasarımının buna göre gerçekleştirilmesi son derece önemlidir. ÇYTHYE-2018'in Bölüm 10'u çelik elemanların kesme kuvveti etkisi altındaki tasarımını ele alır.

Özellikle çift simetri eksenli I kesitli elemanlar için, yönetmeliğin 10.2.1 maddelerine göre tasarım yapılır. Kesme kuvveti sınırını belirlemek için denklem (8) kullanılır. Elemanın taşıdığı kesme kuvveti, bu sınır değerden küçük olmalıdır; aksi halde kesit büyütülmesi veya malzeme sınıfının iyileştirilmesi gibi adımlar atılmalıdır. Bu tasarım aşaması, çubuk elemanın kesme yüklemesine karşı dayanıklılığını ve güvenliğini sağlamayı amaçlayan kritik bir adımdır.

$$V_n = 0,6 F_y A_w C_{v1} \quad (8)$$

Burada;

“ $A_w$ ” gövde kesit alanı ( $=h t_w$ ), “ $C_{v1}$ ” gövde kesme kuvveti dayanım katsayısı

$$V_n = 0,6 (355 \times 10^3)(0,954 \times 10^{-3})(1,0) = 203,202 \text{ kN bulunur.}$$

YDKT çerçevesinde, karakteristik kesme kuvveti, tasarım katsayısı ( $\Phi_v = 1.0$ ) ile çarpılarak tasarım kesme kuvveti elde edilir. Bu yöntem, yapı elemanlarının kesme yüklemelerine karşı dayanıklılığını ve tasarımını belirlemek için kullanılan bir yaklaşımdır.

$$V_d = V_n \Phi_v = 203,202 (1,0) = 203,202$$

$$\frac{V_u}{V_d} = \frac{1,714}{203,202} = 0,0084 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

### 3.7. Moment etkisi altındaki çubuğun tasarımı

Moment etkisi altındaki bir çelik elemanın tasarımı, elemanın maruz kaldığı gerilme seviyelerinin belirlenmesi ve elemanın eğilme momentine karşı direnme kapasitesinin hesaplanmasını içerir. Bu tasarım sürecinde, elemanın kesit boyutları, geometrisi ve malzeme özellikleri gibi faktörler, gerilme seviyelerini ve direnç kapasitesini etkileyen önemli unsurlardır.

Çelik yapı elemanları, elastik davranış göstermeleri hedeflenir. Bu, elemanın eğilme momenti etkisi ortadan kaldırıldığında orijinal şekline geri dönebileceği anlamına gelir. Ancak, elemanın elastik sınırları aşıldığında, yani gerilme seviyesi belirli bir eşik değerinin üzerine çıktığında, eleman plastik hale gelir ve kalıcı şekil değişiklikleri oluşur. Tasarımın temel prensiplerinden biri, elemanın akma sınırı altında kalacak şekilde kesitin belirlenmesidir. Model sisteminin en kritik elemanı, Şekil 14'te gösterildiği gibi eğilme momentine maruz kalır. Bu elemanın tasarımı, ÇYTHYE-2018 koşulları göz önünde bulundurularak kontrol edilir. Eğilme momentine karşı dayanma kapasitesi bu tasarım aşamasında belirlenir. Eğilme momenti altındaki elemanların tasarımı, ÇYTHYE-2018'in



bölüm 9 kurallarına göre gerçekleştirilir. Bu aşamada elemanın güvenli ve dayanıklı bir şekilde eğilme momentine karşı direnme kapasitesi sağlanmış olur.

### 3.7.1. Yerel burkulma için enkesit sınıflandırılması

Eğilme momentinin basınç bileşeni etkisine maruz kalan eleman kesitleri için, yerel burkulma sınır koşulları; kompakt, kompakt olmayan ve narin enkesit olmak üzere üç farklı durumda incelenir. Bu koşullar, elemanın burkulma dayanıklılığını etkileyen önemli faktörleri değerlendirmek amacıyla belirlenir.

Yerel burkulma sınır değeri olan  $\lambda$ , en az bir kesit parçası için  $\lambda_p$  sınır değerini aşmadığı durumda "kompakt enkesit" olarak kabul edilir. Yerel burkulma sınır değeri olan  $\lambda$ ,  $\lambda_p$  sınır değerini aşsa da  $\lambda_r$  değerini aşmadığında "kompakt olmayan enkesit" olarak sınıflandırılır.  $\lambda$  değeri,  $\lambda_r$  değerini aştığı durumda ise kesit "narin enkesit" olarak adlandırılır. Bu sınıflandırmalar, elemanın kesit yapısının ve geometrisinin burkulma davranışını anlamak ve tasarlamak açısından kritik bir rol oynar.

Seçilen tasarım, çift simetri eksenli IPE-180 profilinin eğilme momentinin basınç bileşeni etkisine maruz kalan başlık ve gövde parçaları için yapılmıştır. Yerel burkulma kontrolü, denklem (9) ve (10) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu denklemler, elemanın burkulma davranışının ve dayanıklılığının analiz edilmesinde kullanılır. Başlık parçası için (Tablo 5.1B, Durum 10 )

$$\lambda = \frac{b}{2t_w} = \frac{45,5}{5,3} = 8,58 < \lambda_p = 0,38 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 0,38 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 9,24 \quad (9)$$

Gövde parçası için (Tablo 5.1B, Durum 15 )

$$\lambda = \frac{d}{t_w} = \frac{146}{5,3} = 27,55 < \lambda_r = 3,76 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,76 \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 91,45 \quad (10)$$

$\lambda$  değeri,  $\lambda_p$  değerinden küçük olduğundan dolayı, yerel burkulma "kompakt enkesit" olarak sınıflandırılır. Çift simetri eksenli I kesitli elemanlar için, kuvvetli eksen etrafındaki eğilme etkisi altında kesit parçaları "kompakt" olarak sınıflandırılır. Bu durumda, yönetmeliğin bölüm 9.2'sinde belirtilen sınır değerlere göre hesaplama yapılmalıdır. Bu bölümde, akma sınır durumu ve yanal burulmalı burkulma sınır durumu kontrol edilmelidir. İki durumun koşullarına göre, daha küçük olan moment, kapasite dayanımı için kabul edilecektir. Bu tasarım yaklaşımı, elemanın kuvvetli ekseninde maruz kaldığı eğilme etkisinin dayanıklılığını ve güvenliğini sağlamayı amaçlar.

### 3.7.2. Plastik eğilme momenti sınır durumu

Eğilme momenti etkisi altında eleman kesitinde meydana gelen akma sınır moment değeri, denklem (11) kullanılarak hesaplanmıştır. Yönetmeliğin gereklilikleri doğrultusunda birleşik etkiler dikkate alınacak ve bu nedenle kiriş üzerindeki moment etkisi hem güçlü ekseninde (M 3-3) hem de zayıf eksen (M 2-2) yönlerinde hesaplanacaktır. Bu yöntem, elemanın kesitindeki akma sınır moment değerinin ve dolayısıyla dayanıklılığının hem güçlü ekseninde hem de zayıf ekseninde gerçek dünya etkilerini yansıtacak şekilde hesaplanmasını amaçlar.

$$M_n = M_p = F_y W_p \quad (11)$$

Güçlü ekseninde plastik gerilme momenti:

$$M_{nx} = M_{px} = F_y W_{px} = 355 \times 0,166 = 58,93 \text{ kN.m}$$

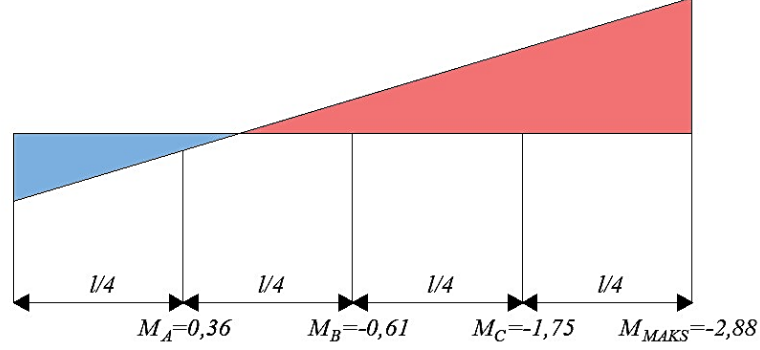
Zayıf ekseninde plastik gerilme momenti:

$$M_{ny} = M_{py} = F_y W_{py} = 355 \times 0,0346 = 12,28 \text{ kN.m}$$

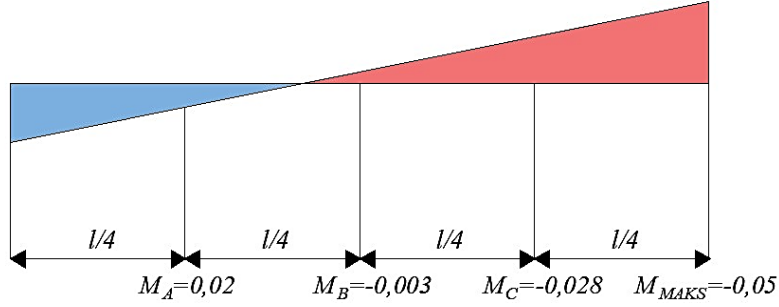
### 3.7.3. Güçlü eksen etrafında yanal burulmalı burkulma sınır durumu

Plastik eğilme sınır durumunda olduğu gibi, bu durum için de kiriş üzerindeki moment etkisi hem güçlü ekseninde (M 3-3) hem de zayıf eksen (M 2-2) yönünde hesaplanacaktır. Kritik elemanın güçlü ekseninde oluşturduğu

moment diyagramı Şekil 15'te, zayıf eksende oluşturduğu moment diyagramı ise Şekil 16'da gösterilmiştir. Bu hesaplamalar, elemanın plastik davranışını ve dayanıklılığını anlamak için önemlidir ve tasarım sürecinin güvenli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesine yardımcı olur.



Şekil 15. Kritik elemanın güçlü ekseninde (M 3-3) oluşturduğu moment diyagramı [17]



Şekil 16. Kritik elemanın zayıf ekseninde (M 2-2) oluşturduğu moment diyagramı [17]

Yönetmelik 9.2.2 gereği, yanal burkulma momenti sınır durumu için, enkesit başlığının desteklenmeyen uzunluğu olan  $L_b$ 'ye bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama, elemanın yanal burkulma davranışını analiz etmek ve dayanıklılığını belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Elemanın sınır uzunlukları, denklem (12) ve (13) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemler, elemanın taşıma kapasitesini belirlemek için kullanılır ve tasarım sürecinin güvenliğini sağlamak amacıyla önemlidir.

$$L_p = 1,76i_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (12)$$

$$L_r = 1,95 i_{ts} \frac{E}{0,7F_y} \sqrt{\frac{Jc}{W_{ex} h_o} + \sqrt{\left(\frac{Jc}{W_{ex} h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7F_y}{E}\right)^2}} \quad (13)$$

Burada;

“C” burulma sabiti, “ $L_b$ ” eğilme momenti altında kalan ve stabilite bağlantılarıyla desteklenmesi yapılmayan eleman uzunluğu, “ $L_p$ ” akma sınır durumu için uzunluk, “ $L_r$ ” elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğudur.

$L_r$  olarak bilinen elastik olmayan yanal burulmalı burkulma sınır uzunluğunun hesaplamasında, kullanılacak etkin atalet yarıçapı, denklem (14)'te bulunmuştur.

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{d t_w}{b_f t_f}\right)}} = \frac{91}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{146,5,3}{91 \cdot 8}\right)}} = 0,0242 \text{ m} \quad (14)$$

$$L_p = (1,76)(0,0206) \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 0,88 \text{ m}$$

$L_r$  hesabında kullanılacak olan burulma sabiti "C", çift simetri eksenine sahip I enkesitleri için ÇYTHYE-2018 gerekliliklerine göre  $C=1.0$  olarak belirlenir. Bu bağlamda,

$$L_r = 0,95 (0,0242) \frac{21 \times 10^7}{0,7(355 \times 10^3)} \times \sqrt{\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{1,46 \times 10^{-4} \times 0,172} + \sqrt{\left(\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{1,46 \times 10^{-4} \times 0,172}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7(355 \times 10^3)}{21 \times 10^7}\right)^2}}$$

$L_r = 2,97 \text{ m}$  bulunur.

Yönetmelik 9.22 (b) hükmüne göre, elemanın sınır uzunlukları şu şekildedir:  $L_p=0,88 \text{ m} < L_b=2,828 \text{ m} \leq L_r=2,97 \text{ m}$ . Bu aralık içinde olduğu için karakteristik eğilme momenti mukavemeti hesaplaması, denklem (15) kullanılarak yapılacaktır. Bu hesaplama, elemanın eğilme davranışını değerlendirerek tasarım sürecinin dayanıklılık ve güvenlik yönünden uygunluğunu sağlamayı amaçlar.

$$M_n = c_b \left[ M_p - (M_p - 0,7F_y W_{ex}) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \quad (15)$$

Eğilme momenti hesabında kullanılacak burulma sabiti, denklem (16)'ya göre hesaplanır. Bu denklem, elemanın kesit özellikleri ve geometrisi doğrultusunda burulma dayanıklılığını belirlemek için kullanılır. Moment değerleri, bu hesaplamalar sırasında kullanılacak olan kritik parametrelerdir. Bu değerler, Şekil 16'da görsel olarak sunulmuştur ve tasarım sürecinde elemanın eğilme davranışını analiz etmek için önemlidir.

$$C_b = \frac{12,5M_{maks}}{2,5M_{maks} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (16)$$

$$C_b = \frac{12,5(2,88)}{2,5(2,88) + 3(0,36) + 4(0,61) + 3(1,75)} = 2,25$$

$$M_n = 2,25 \left[ 58,93 - (58,93 - 0,7(355)(0,146)) \left( \frac{2,83 - 0,88}{2,97 - 0,88} \right) \right] = 85,05 > M_p$$

Güvenlik sağlamak amacıyla, hesaplanan akma ve burulmalı burkulma momentlerinden daha küçük olan bir tasarım momenti seçilir. Bu nedenle, tasarım sürecinde  $M_n=M_p=58,93 \text{ kN.m}$  değeri tercih edilmiştir. Bu yaklaşım, elemanın taşıma kapasitesini ve dayanıklılığını garanti altına alarak yapılan bir tasarım stratejisini yansıtır. YDKT çerçevesinde, karakteristik eğilme momenti, tasarım katsayısı ( $\Phi_c = 0.90$ ) ile çarpılarak tasarım momenti elde edilir. Bu yöntem, elemanın eğilme yüklemelerine karşı dayanıklılığını ve tasarımını belirlemek için kullanılan bir yaklaşımdır. Karakteristik eğilme momenti, yapı elemanının mukavemetini temsil ederken, tasarım katsayısı güvenlik ve yük değişkenliği gibi faktörleri dikkate alarak tasarımın güvenliğini sağlar.

$$M_d = \Phi_b M_n = 0,9 \times 58,93 = 53,037 \text{ kN.m}$$

$$\frac{M_u}{M_d} = \frac{2,883}{53,037} = 0,054 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

### 3.7.4. Zayıf eksen etrafında yanal burulmalı burkulma sınır durumu

Zayıf eksen üzerinde oluşan moment değerleri Şekil 16'da görsel olarak sunulmuştur. Zayıf eksen yönünde oluşan eğilme momenti sınır hesabı için, ilk olarak sınır uzunluklarına göre moment değeri belirlenir. Bu bağlamda, denklem (12) ve (13) çözümlenerek elemanın sınır uzunlukları durumuna bağlı olarak moment değeri hesaplanmıştır. Bu adımlar, elemanın zayıf eksen yönündeki eğilme davranışını analiz etmek ve dayanıklılığını sağlamak amacıyla gerçekleştirilir.

$$L_p = (1,76)(0,07423) \sqrt{\frac{21 \times 10^7}{355 \times 10^3}} = 3,18 \text{ m}$$

$$L_r = 0,95 (0,0242) \frac{21 \times 10^7}{0,7(355 \times 10^3)} \dots$$

$$\times \sqrt{\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{2,2 \times 10^{-5} \times 0,172} + \sqrt{\left(\frac{4,81 \times 10^{-8} \times 1}{2,2 \times 10^{-5} \times 0,172}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7(355 \times 10^3)}{21 \times 10^7}\right)^2}} = 3,1 \text{ m}$$

Yönetmelik 9.22 (a) hükmüne göre elemanın sınır uzunlukları şu şekildedir:  $L_b = 2,828 < L_p$ . Bu durumda, karakteristik eğilme momenti mukavemeti hesaplamasında burulmalı burkulma sınır durumunun dikkate alınmasına gerek yoktur. Bu nedenle, tasarım sürecinde zayıf eksende akma sınır durumu için hesaplanmış olan değer kullanılmıştır. Bu yaklaşım, elemanın tasarımını daha basit ve güvenli bir şekilde gerçekleştirmeyi amaçlar.

YDKT yöntemine göre, karakteristik eğilme momenti tasarım katsayısı ( $\Phi_b = 0.90$ ) ile çarpılarak tasarım momenti elde edilir.

$M_d = \Phi_b M_n = 0,9 \times 12,28 = 11,052 \text{ kN.m}$  bulunur.

$$\frac{M_u}{M_d} = \frac{0,05}{11,52} = 0,0047 \leq 1$$

Yönetmeliğe göre etki/ kapasite oranı  $\leq 1$  olduğundan çubuk yükü güvenle taşır

### 3.8. Birleşik yük etkisi altındaki çubuğun tasarım kontrolü

Burulma etkisi olup olmadığına bakılmaksızın, eleman üzerinde meydana gelen eksenel kuvvet ve eğilme moment etkisinin birleşik olarak ele alındığı tasarım türüdür. Bu tasarım, Yönetmelik bölüm 11'de belirtilen kurallar ve sınırlamalar dikkate alınarak gerçekleştirilir. Kritik çubuk elemanı için, eğilme momenti ve eksenel basınç etkisi birlikte göz önünde bulundurularak, Yönetmelik bölüm 11.2'ye uygun olarak hesaplamalar yapılır.

Bu çerçevede, çift simetri eksenli olan elemanlarda, eksenel basınç ve eğilme momenti etkilerinin birleşik olarak incelenmesi durumunda, denklem (17) kurallarına göre birleşik etki etkileşim sınırlaması yapılacaktır. Bu adımlar, elemanın farklı yüklemeler altındaki davranışını analiz etmek ve tasarımının güvenli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla atılır.

$$\frac{P_r}{P_c} \geq 0,2 \quad \text{için} \quad \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{P_r}{P_c} < 0,2 \quad \text{için} \quad \frac{P_r}{2P_c} + \left( \frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (17)$$

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{117,447}{206,6} = 0,57 \geq 0,2 \quad \text{bulunur.}$$

Denklem (17) için 1. durum uygun olduğu göz önüne alındığında, bu oranla birleşik yük tesiri altındaki elemanın etki/kapasite oranı birleşik etkileşim hesaplaması için hesaplanır.

$$\frac{117,447}{206,6} + \frac{8}{9} \left( \frac{2,883}{53,037} + \frac{0,05}{11,052} \right) = 0,658 \leq 1$$

Yönetmelik gerekliliklerine göre, kritik çubuk elemanı birleşik etki altındayken yükü etki/kapasite oranına uygun bir şekilde güvenle taşımaktadır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Modelin kubbe geometrisi, yapının farklı bölgelerinde ve yük durumlarına bağlı olarak çeşitli gerilme koşullarını beraberinde getirir. Bu, kubbenin tasarım ve dayanıklılık açısından ilişkili olduğunu göstermektedir. Etek bölgelerinde, genellikle çekme gerilmeleri oluşur. Ancak, bu çekme gerilmeleri kubbenin simetrisine ve yük dağılımına bağlı olarak değişebilir. Özellikle simetrik yükler altında, çember kirişlerinin etek bölgelerinde aynı değerlerde çekme gerilmelerine maruz kaldığını görürüz. Ancak tepe noktasına yaklaştıkça, bu çekme gerilmeleri azalırken basınç gerilmeleri artar. En yüksek basınç gerilimi, genellikle çember kirişlerinin tepe noktasında meydana gelir. Bununla birlikte, asimetrik yükler veya düzensiz yük dağılımları altında, çubuk elemanları yük durumuna bağlı olarak hem çekme hem de basınç gerilmelerine maruz kalabilirler. Bu nedenle, çubuk elemanlarının tasarımı sırasında her çubuk elemanı için çekme ve basınç gerilmelerini dikkate alınması gerekmektedir. Radyal kirişler, simetrik yükler altında radyal olarak simetrik gerilmelere neden olur. Ancak yükün dağılımına bağlı olarak bu gerilmeler farklılık gösterebilir. Tepe noktasına doğru ilerledikçe, basınç gerilimi etkisi azalır. Ancak asimetrik yükler altında, her bir radyal kiriş farklı gerilme koşullarına maruz kalabilir. Bu, radyal kirişlerin tasarımında her bir elemanın çekme ve basınç gerilmelerini ayrıntılı bir şekilde analiz etmeyi ve tasarlamayı gerektirir. Yapının stabilitesi ve dayanıklılığı açısından, her bir radyal kirişin yük durumuna bağlı olarak çekme ve basınç gerilmelerine uygun dayanımı sağlaması büyük önem taşır.

Tüm bu faktörler, Model'in kubbe geometrisi ve yük koşullarına bağlı olarak farklı gerilme koşullarına maruz kalacağını gösterir. Bu bilgiler, yapısal analiz ve tasarım süreçlerinde büyük bir rol oynamakta ve Model kubbenin stabilitesini, dayanıklılığını ve yapısal gereksinimlerini karşılamasına yardımcı olmaktadır. Yapının başarılı bir şekilde tasarlanması, bu karmaşık gerilme koşullarını hesaba katmayı gerektirir ve bu da mühendislerin ve tasarımcıların detaylı bir analiz ve dikkatli bir planlama yapmalarını zorunlu kılar. Bu çalışmanın sonuçları, tek katmanlı çelik kubbe modelinin analiz ve tasarımının başarılı bir şekilde tamamlandığını ve yapısal hesaplamaların doğru bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Kubbenin geometrisi, tek katmanlı yapısı ve farklı yük koşullarına bağlı olarak farklı gerilmelere maruz kaldığını açıkça ortaya koymaktadır. Tasarım sürecinde, çekme ve basınç gerilmelerine uygun elemanların seçilmesi, sistemin güvenliği için hayati öneme sahiptir.

Kubbe modelinin yapısal gereksinimleri karşılayarak güvenlik ve dayanıklılık sağlaması, bu çalışmanın önemli bir başarısıdır. Ayrıca, SAP2000 programı kullanılarak AISC 360-10 yönetmeliğine göre tasarlanan kesitlerin ÇYTHYE-2018'e göre kontrol edildiği belirtilmiştir. Tablo 2 ve Tablo 3 ile sunulan veriler, zayıf eksen etrafında moment altındaki çubuk boyutlandırma kontrolünün ve birleşik yük etkisi altında gerilme kontrolünün aynı veya çok benzer sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu da yapı güvenliğinin sağlandığını ve iki farklı yönetmeliğin benzer sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Kubbe modelinin güvenli ve dayanıklı bir şekilde tasarlanması, yapıların uzun ömürlü olmasını ve insanların güvende kalmasını sağlar. Ayrıca, farklı yönetmeliklere göre yapılan tasarımların benzer sonuçlar vermesi, uluslararası standartların ve güvenlik gereksinimlerinin önemini gösterir.

**Tablo 2.** Kritik Elemanın Zayıf Eksendeki Moment Altında Boyutlandırma Kontrolü [17]

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYE-2018'e göre Manuel Hesap (kN)
<b>Etki Momenti, <math>M_u</math></b>	0,052	0,052
<b>Plastik Eğilme Momenti, <math>M_p</math></b>	12,28	12,28
<b>Yanal Burulmalı Burkulma Momenti, <math>M_n</math></b>	-	-
<b>Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>M_d</math></b>	11,05	11,05
<b>Etki / Kapasite oranı</b>	0,045	0,047

**Tablo 3.** Kritik Elemanın Birleşik Yük Etkisi Altında Boyutlandırma Kontrolü [17]

	AISC 360-10'a Göre Program Çıktısı (kN)	ÇYTHYE-2018'e göre Manuel Hesap (kN)
<b>Etki kuvveti, <math>P_u</math></b>	117,445	117,445
<b>Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>P_d</math></b>	195,06	206,59
<b><math>P_r/P_c</math></b>	-	0,57
<b>(<math>M_{3-3}</math>) Etki Momenti, <math>M_u</math></b>	2,883	2,883
<b>(<math>M_{3-3}</math>) Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>M_d</math></b>	53,037	53,04
<b>(<math>M_{2-2}</math>) Etki Momenti, <math>M_u</math></b>	0,052	0,052
<b>(<math>M_{2-2}</math>) Tasarım Kapasite Kuvveti, <math>M_d</math></b>	11,05	11,05
<b>Birleşik Yük Etkisinde Etki/Kapasite Oranı</b>	0,655	0,658

Bu çalışma, inşaat ve yapı mühendisleri, mimarlar, yapısal analiz ve tasarım uzmanları için faydalı bilgiler içermektedir. Ayrıca, çift katmanlı kubbe sistemleri veya benzer yapısal sistemlerin analizi ve tasarımıyla ilgilenen araştırmacılar, akademisyenler ve öğrenciler de bu çalışmadan yararlanabilirler. Bu çalışmanın sonuçları, yapı mühendisliği projelerinde daha güvenli ve dayanıklı tasarımlar yapma amacı güden profesyonellere ve tasarımcılara rehberlik edebilir. Ayrıca, yapısal analiz ve tasarım süreçlerinde kullanılacak önemli bir kaynak olarak kullanılabilir.

### Kaynaklar

- [1] TS EN 1991-1-3, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-3: Genel etkiler, kar yükleri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2009.
- [2] TS EN 1991-1-4, Yapılar üzerindeki etkiler – Bölüm 1-4: Genel etkiler - rüzgâr etkileri, Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
- [3] Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, 2018.
- [4] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Ankara: Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018.
- [5] AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings, Chicago: American Institute of Steel Construction, 2010.
- [6] Timoshenko SP, Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells, Singapore: McGraw-Hill, 1959.
- [7] Timoshenko SP. Theory of Elastic Stability, New York: McGraw-Hill Book Co. Inc, 1961.
- [8] Papadopoulos CM, LoRicco MT. «Symmetry-adapted computation: A case study of the Bucharest dome,» %1 içinde *In Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, Montreal, Canada, 2006.
- [9] Soykan K. Çelik uzay kubbe sisemlerin ağırlıkça optimum dizaynı, (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi: Konya, 2007.
- [10] Çiftçi C. Stability of steel dome structures, (Yüksek lisans tezi). Boğaziçi Üniversitesi: İstanbul, 2009.
- [11] Karabulut U. Geniş açıklıklı uzay kafes sistemlerin ilgili türk ve avrupa standartları uyarınca karşılaştırmalı olarak incelenmesi, (Yüksek lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi: Trabzon, 2018.
- [12] Kara T. Tek tabakalı kubbelerin taşıyıcı sistemlerinin yönetmelikler açısından değerlendirilmesi, (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi: İstanbul, 2019.
- [13] Özcan M. Tek katmanlı uzay kafes kubbelerde çapraz eleman kullanımının tasarıma etkisinin belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2019.

- [14] Yılmaz G. Tek Katmanlı Uzay Kafes Kubbelerde Berkitme Elemanı Kullanımının Tasarıma Etkisinin Belirlenmesi, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2021.
- [15] Adnanoğlu A. Farklı açıklıklara sahip dolu gövdeli kubbe kafes sistemler ile dairesel boşluklu kubbe kafes sistemlerin tasarım ve maliyet karşılaştırılması, (Yüksek lisans tezi). Akdeniz Üniversitesi: Antalya, 2022.
- [16] Wang F, Jiang G. «Numerical Investigations of Wind Loads on Spherical Structures with Various Types of Configurations,» *Buildings*, pp. 12(11), 1832, 2022.
- [17] Bektaş MA. Çelik Uzay Kafes Kubbe Sistemlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türk Çelik Yapılar Tasarım Yönetmeliğine Göre Analiz ve Tasarımı, Dicle Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi).Diyarbakır, 2023.
- [18] Glenn AH. «Snap-Through Instability Patterns in Truss Structures,» %1 içinde *In 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th*, 2010.
- [19] Li Y, Xu YL. «Tuning and switching of band gap of the periodically undulated beam by the snap through buckling,» *AIP Advances*, p. 7(5), 2017.
- [20] BS EN 10365, Hot Rolled Steel Channels, I and H Sections. Dimensions and Masses, Brüksel: European Committee for Standardization, 2017.





## Mansap Pürüzlülüğünün Toprak Dolgu Barajın Üstten Aşma ile Yıkılması Durumunda Taşkın Dalgası ve Sediment Yayılımına Etkisinin Deneysel olarak İncelenmesi

Zehra BÜYÜKER<sup>1\*</sup>, Ebru TAŞKAYA<sup>2</sup>, Gökçen BOMBAR<sup>3</sup>, Gökmen TAYFUR<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye

<sup>4</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye

\*<sup>1</sup> zehra.buyuker@ikcu.edu.tr, <sup>2</sup> ebruutsky@gmail.com, <sup>3</sup> gokcen.bombar@ikcu.edu.tr, <sup>4</sup> gokmentayfur@iyte.edu.tr

(Geliş/Received: 20/09/2023;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Öz:** Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın hareketinin belirlenmesi, mansap bölgesindeki mevcut yerleşim yerlerinde yıkılma sonrası meydana gelebilecek risklerin saptanması ve önlenmesi açısından önemli bir konudur. Sel nedeniyle suyun yayılması ve sediment taşınımının analiz edilmesi, taşkın hareketinin belirlenmesi için toprak dolgu barajlarda incelenen faktörler arasındadır. Bu çalışmada, üstten aşma ile yıkılan homojen toprak dolgu barajın mansabında yerleşim bölgesi bulunup bulunmamasının taşkın hareketine etkisi araştırılmıştır. Dikdörtgen kesitli betonarme kanalda medyan dane çapı  $d_{50}=0,441$  mm olan malzemeyle baraj gövdesi oluşturulmuştur. Barajın temelde genişliği 106 cm ve krette genişliği 10 cm ve gövde yüksekliği 30 cm'dir ve 1:1,6 memba ve mansap eğimlerine sahiptir. Her biri 10 cm olan üç kat sedimentin kademeli olarak serilmesi, her katın 1,5 kg ağırlık ile sıkıştırılması, eğimin verilmesi ve kret üzerine bir gedik açılması ile baraj gövdesi hazır hale gelmiştir. Baraj mansabına yerleşim alanını simüle etmesi için 10x10x10 cm'lik 13 adet beton küp yerleştirilmiştir. Baraj membasında su seviyesi kret seviyesine kadar kademeli olarak arttırılmış, açılan gedikten suyun baraj mansabına geçmesi sağlanmıştır. Deneyler yapılırken 2 kamera ile sedimentin yayılımı kayıt altına alınmıştır, 3 farklı noktada su derinlikleri ölçülmüştür. Deneyler sonunda yapılan ölçümler ile sedimentin derinlik profilleri elde edilmiştir. Baraj mansabında yerleşim yeri bulunması durumunda, küplere çarpan taşkın dalgasının hızı azalmış ve cetvele ulaşma süresi artmıştır. Küplerin etkisiyle baraj mansabında ölçülen taşkın dalgası derinlikleri artmıştır. Küplerin memba ve mansap bölgelerinde köprü ayağına benzer olarak oyulmalar ve birikmeler meydana gelmiştir. Bu birikmelere bağlı olarak yayılan sediment kalınlığı pürüzlü deneyde artmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Toprak dolgu baraj yıkılması, sediment taşınımı, üstten aşma, pürüzlülük.

## Experimental Investigation of the Effect of Downstream Roughness on Flood Wave and Sediment Propagation in case of an Earth-Fill Dam Break by Overtopping

**Abstract:** Detection of flood propagation resulting from the failure of the dam is an important topic in terms of detecting and preventing risks that may occur after the dam break in the residential areas at the downstream region. The analysis of flood movement and sediment transport due to flooding is among the factors examined to determine flood movement in earth-fill dams. In this study, the effect of the presence of a residential area at the downstream of the homogeneous earth-fill dam, which was failed by overtopping, on the flood movement was investigated. The dam body was built in a rectangular reinforced concrete channel with a material, which has  $d_{50} = 0.441$  mm median grain diameter. The width of the dam at the foundation is 106 cm, the width at the crest is 10 cm and the body height is 30 cm. and upstream and downstream slopes of 1:1.6. The dam body is ready by laying three layers of sediment, each layer of which is 10 cm, gradually, compacting each layer with a weight of 1.5 kg, giving the slope and opening a breach on the crest. 13 concrete cubes of 10x10x10 cm were placed to simulate the residential area in the downstream of the dam. The water level at the upstream of dam was gradually increased until the crest level and it was ensured that the water passed from the breach to the downstream of the dam. During the experiments, the distribution of the sediment was recorded with 2 cameras, water levels were measured at 3 different points. Depth profiles of the sediment were obtained with the measurements taken at the end of the experiments. In the case of residential area at the downstream of the dam, the speed of the flood wave hitting the cubes decreases and the time to reach the ruler increases. With the effect of the cubes, the flood wave depths measured downstream of the dam body have increased. Scours and accumulations similar to bridge piers have occurred in the upstream and downstream regions of the cubes. Depending on these accumulations, the sediment height spreading to the settlement area has increased.

**Key words:** Earth-fill dam failure, sediment transport, overtopping, roughness.

### 1. Giriş

Çok eski zamanlardan beri su ihtiyacını karşılamak için büyük nehirler üzerine kurulan barajlar, özellikle bol yağış alan bölgelerde selden gelen fazla suyu kontrol altına alarak sel taşkınlarını önlemiş ve suyu bir rezervuarda depolamıştır. Günümüzde ise enerji üretimi, tarımsal sulama, sanayi ve içme suyunun büyükşehir ağlarına

\* Sorumlu yazar: [zehra.buyuker@ikcu.edu.tr](mailto:zehra.buyuker@ikcu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-9987-0951, <sup>2</sup> 0000-0003-1265-600X, <sup>3</sup> 0000-0002-8156-6908, <sup>4</sup> 0000-0001-9712-4031

ulaştırılması, su ürünleri yetiştiriciliği ve atık endüstrisi gibi çeşitli amaçlarla beraber ekolojik yönetime de hizmet eden su yapılarıdır [1]. Mühendislik alanındaki teknolojik gelişmeler, bu önemli yapıların daha büyük boyutta inşaa edilmesine olanak sağlamıştır. Ancak barajların boyutlarının büyümesi ile artan rezervuar hacmi, farklı sebeplerden baraj yıkılması sonucu hızla yayılan taşkın dalgasının etkisiyle baraj mansabında, özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde, ciddi can ve mal kayıplarına sebebiyet veren bir tehlike arz etmektedir [2].

ABD’de 1889 yılında South Fork Barajı’nın yıkılması sonucu 2200 kişi hayatını kaybetmiştir. İtalya’da 1963 yılında dünyanın en büyük barajı olan Vajont Barajı’nın yıkılması, 2600 kişinin ölmesine ve çevresindeki köylerin neredeyse tamamen yok olmasına sebep olmuştur [3]. Ayrıca Çin Halk Cumhuriyeti’nde, 8 Ağustos 1975 tarihinde yıllık yağış miktarının bir gün içinde düşmesi sonucu meydana gelen olayda, büyüklü küçüklü 62 adet baraj yıkılmış olup tarihteki en büyük baraj felaketi olarak bilinmektedir. Taşkın esnasında 26.000, sonraki süreçte açlık ve salgın hastalıklar sebebiyle 145.000 kişi hayatını kaybetmiş, 5.960.000 bina yıkılmıştır. 2019 yılında Brezilya’da Feijão demir cevheri madeni yakınındaki 12 milyon metre küp kapasitesi olan barajın yıkılmasıyla barajdaki atık su, baraj tesislerini, yakındaki yerleşimleri çamura gömmüştür. 2023 yılında Libya’nın Derne şehrinde sel ve fırtınanın etkili olması sonucu iki baraj yıkılmış olup Derne kentinin dörtte biri sular altında kalmıştır. Bu felaket, binlerce kişinin ölümüne ve kaybolmasına neden olmuştur.

Verilen felaket örnekleri her ne kadar nadir meydana gelebilecek olsa da baraj güvenliğinin önemini ve yıkılma sonucu oluşan kayıpların ne kadar büyük olduğunu göstermektedir. Bu zararların en aza indirgenmesi için deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen taşkın yayılımı ve taşkın dalgalarının yerleşim alanlarına ulaşma süresi verileri kullanılarak baraj mansabında taşkına maruz kalacak alanların önceden belirlenmesi ve bölgede yaşayan insanları erken uyararak ve tahliye etmek için acil durum planı hazırlanması ve zarar risk haritalarının oluşturulması büyük önem taşımaktadır [4], [5].

Tingsanchali ve Chinnarasri [6], bir kanalda homojen bir baraj gövdesi inşaa ederek deneyler yapmış ve tek boyutlu olarak modellemişlerdir. Güney vd. [7], Ürkmez Barajı’nın üç boyutlu çarpık bir fiziksel modelini inşaa ederek barajın yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasını incelemişlerdir. Model, memba rezervuarı, baraj gövdesi ve mansap bölgesinin topoğrafya ve yapılaşma temsilinden oluşmaktadır. Cao vd. [8], yıkılan barajlardaki hareketli tabanı inceleyerek üstten aşmanın neden olduğu morfolojik yapının gelişimini tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Sığ su hidrodinamiğine göre bir model geliştirmişlerdir. Baraj yıkılmasının ardından mansap bölgesinde ağırlıklı olarak taşkın dalgası taban formları elde etmişler ve sediment erozyonuna bağlı olarak oluşan hidrolik sıçramanın zamanla kaybolduğunu gözlemlemişlerdir. Paşa vd. [9], HEC-RAS programında ardışık iki baraj olan Elmalı 1 ve Elmalı 2’den, beton payandalı Elmalı 2 Barajı’nın, Elmalı 2’nin gedik oluşma süresi ve yıkılan payanda sayısı ile Elmalı 1’in rezervuar hacmi parametreleri değiştirilerek 88 adet yıkılma analizi yapmışlar ve taşkın mansap bölgesinde yer alan yüksek yoğunluklu yerleşim alanı ve otoyol üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Elde edilen maksimum su derinliği, maksimum debi gibi veriler üzerinde Elmalı 1’in rezervuar hacminin önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, su baskını ve taşkın tehlike haritaları kullanılarak karşılaştırmalı alan değişim analizi ile potansiyel taşkınlardan etkilenen toplam alan hesaplanmıştır. Najar ve Gül [10], Ürkmez Barajı’nın üstten aşma ve borulanma sebebiyle yıkılma ve taşkın dalgası yayılımını incelemek ve tehlike haritalarını elde etmek için farklı başlangıç koşulları ve gedik oluşma parametreleri altında HEC-RAS iki boyutlu hidrodinamik modelini kullanmışlardır. Ürkmez Barajı’nın gedik parametrelerini tahmin etmek için ise baraj gedik özelliklerini (örneğin, baraj gedik büyüklüğü ve gedik oluşum süresi) tahmin etmeye yönelik beş farklı modelleme yaklaşımı dikkate alınmıştır. Rezervuardaki beş farklı su seviyesi için yapılan analizler sonucunda, Froehlich yaklaşımının baraj gedik parametrelerinin tahmininde en makul yöntem olduğu elde edilmiştir. Ayrıca, duyarlılık analizi, gedik eğimi parametresinin tepeye ulaşma süresi ve maksimum debi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. [11] yaptığı çalışmada, taşkın dalgasının hızını ve maksimum değerini belirleyen gedik oluşum mekanizması, oluşum hızı ve son boyutlarını etkileyen önemli parametrelerin baraj gövde malzeme kohezyonu, iç sürtünme, sızma koşulları, sıvı-sediment etkileşimi ve porozite olduğunu göstermiştir. Yılmaz vd. [12], Dalaman Akköprü Barajı’nın üstten aşma ve borulanma senaryoları ile yıkılması durumunda meydana gelecek akış derinliğini, hızını ve mansap bölgesinde bulunan yerleşim yerlerinin tehlike seviyelerini, sığ su ve difüzyon dalga denklemlerini kullanarak HEC-RAS programında modellemişlerdir. Elde edilen sonuçlar hem sığ su hem de difüzyon dalga denklemleri için su altında kalan alanlar benzer olmasına rağmen akış derinliği ve hız değerlerinin önemli ölçüde farklı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çoğu yerleşim yerindeki hasar riskinin yüksek olduğu ortaya koyulmuştur. [13] baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının üç boyutlu yayılımını deneysel ve sayısal olarak inceledikleri çalışmada, barajı temsil eden düşey kapağın ani olarak kaldırılması ile baraj yıkılması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda, dalga önünden geriye doğru gidildikçe hızın azaldığı ve rezervuardaki akımda çok az hareketlenme olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca dalganın yanal yöndeki hız bileşenlerinin akım doğrultusundaki hız bileşenlerinden daha küçük olduğunu gözlemlemişlerdir. [14] yaptıkları çalışmada, kil çekirdekli kurgusal dolgu barajın rezervuarındaki suyun ani çekilmesi durumunda Fellenuis, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price ve Spencer yöntemlerini kullanarak dolgu seviyesini kontrol etmişlerdir.

Rezervuarda ani su çekilmesi başladıktan sonra kısa sürede baraj yüzünün kaymasına karşı güvenlik faktörünün bir miktar azaldığı, ardından artmaya başladığı sonucuna varılmıştır.

Baraj yıkılması sonucu sediment yayılımı üzerine güncel çalışmalardan biri Taşkaya vd.'nin [15] iki farklı gedik derinliği ve genişliğinde; pürüzlü mansap koşulu altında yaptığı deneysel çalışmadır. Deneyler sonucunda gedik derinliğinin artmasıyla sediment taşınımının azaldığı ve barajın mansabındaki sediment kalınlığının arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu konuda yapılan bir diğer çalışma, Taşkaya vd. [16] 60 cm yüksekliğinde, 202 cm genişliğindeki baraj gövdesinin pürüzlü ve pürüzsüz mansap koşulunda olmak üzere üstten aşma senaryosu ile yıkılması durumunu inceledikleri tekrarlı 2 deney için elde ettikleri sonuçlardır. Kanal ekseninde biri baraj gövdesinde ( $x=1,07$  m), biri baraj mansap sınırında ( $x=2,02$  m) ve diğeri baraj mansap bölgesinde ( $x=5,0$  m) olacak şekilde üç farklı noktada, ULS-40D sensörleriyle derinlik değişimleri deneyler boyunca ölçülmüştür. Deneyler sonunda taşınan sedimentin derinlik profilleri yine ULS-40D cihazıyla elde edilmiştir. Elde edilen veriler, iki koşulda da baraj gövdesinin büyük bir kısmının taşkın dalgasının etkisiyle yıkıldığını göstermiştir. Yıkılmanın etkisiyle yerleşim yerini simüle eden tüm küpler çamurlu akıma maruz kalmış olup taşkın dalgasının yüksekliği mansap bölgesine yakın bazı küplerin yüksekliğini aşmıştır. Ayrıca, mansap bölgesinde yerleşim yeri bulunması durumunda sediment kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.

Baraj yıkılmalarının önlenmesi ve azaltılması için araştırılması gereken bir diğer konu barajların yıkılma analizlerinin yapılması olup Zhang vd. [17], literatürde yer alan 593 adet barajın özelliklerini (toprak, beton, taş vb.) ve yıkılma bilgilerini toplayıp karşılaştırdıklarında, yıkılan barajların %65,5'inin toprak dolgu baraj olduğunu ve bu barajların üstten aşma, borulanma, yetersiz temel, doğal afetler, yapıda bulunan kusurlar ve kasıtlı yıkılmalar gibi sebeplerden yıkıldığını görmüşlerdir. Toprak dolgu barajlarda en çok yıkılmaya neden olan faktörün ise %36,4 ile üstten aşma olduğunu kaydetmişlerdir. Üstten aşma ile yıkılma durumunda, yetersiz dolu savak kapasitesi ve taşkınlar nedeniyle baraj rezervuarındaki su, baraj tepe (kret) genişliği boyunca baraj gövdesini aşmakta ve mansap yüzüne ulaşmaktadır. Baraj mansabında başlayan gedik oluşumu baraj memba yüzüne doğru ilerlemektedir. Yıkılma, akımın baraj gövdesini aşındırarak gediği üçgen, trapez ya da dikdörtgen olarak genişletmesi ile daha fazla suyun baraj mansabına geçmesi sonucu meydana gelmektedir [18].

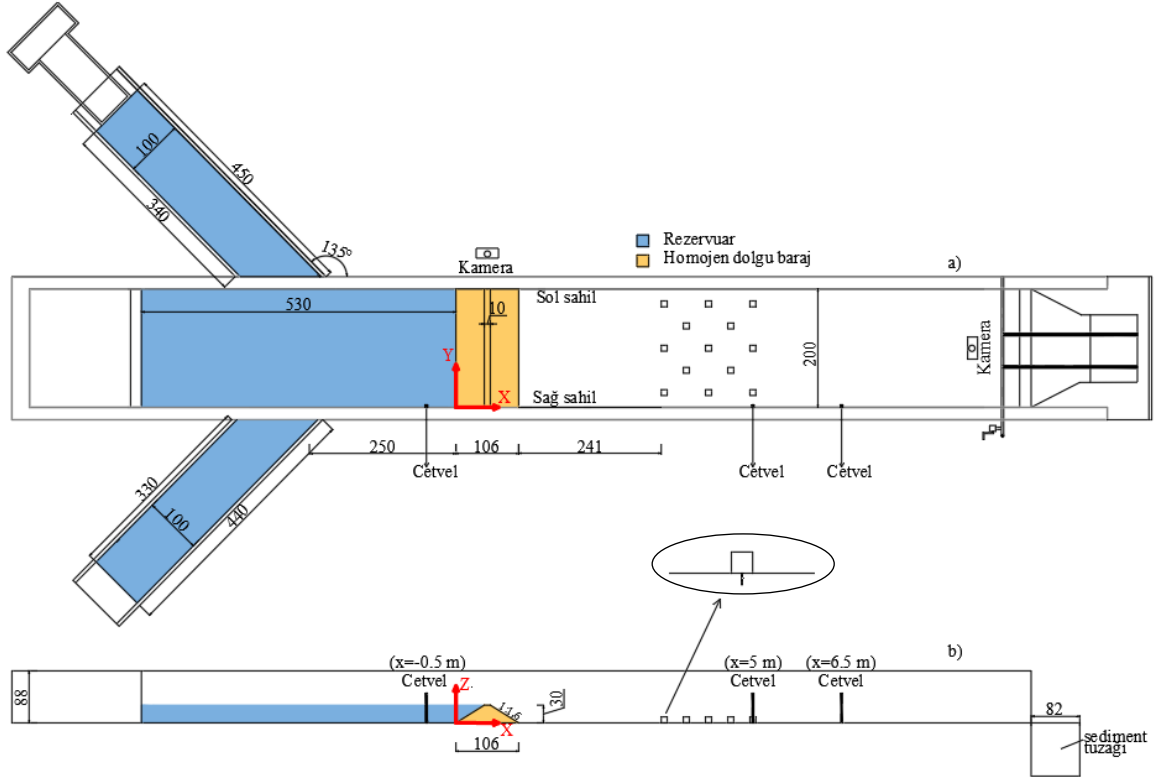
En fazla yıkılmaya maruz kalan toprak dolgu barajlarda taşkın hareketinin belirlenebilmesi için incelenmesi gereken faktörler sel sularının yayılması ve baraj gövdesinden mansap bölgesine taşınan sediment olmasına rağmen daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapılan modellemeler ile taşkın dalgalarının hidrodinamik yapısının belirlenmesi üzerine yoğunlaşıldığı, baraj yıkılması sonucu taşınan dolgu malzemesinin hareketi ve yayılımı üzerine bir boşluk olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada yapılan deneylerde mansap bölgesinde küplerin olduğu durum pürüzlü, olmadığı durum ise pürüzsüz durum olarak tanımlanmıştır. Baraj mansabının pürüzlü ve pürüzsüz olma durumundaki sediment yayılımı ve su derinliğindeki farklılıklarının belirlenmesi amacıyla Taşkaya vd. [19] 30 cm yüksekliğindeki pürüzsüz mansaba sahip homojen toprak dolgu barajın üstten aşma senaryosu ile yıkılması sonucu elde edilen veriler ile aynı deney şartları altında baraj mansabında yerleşim yeri olması (pürüzlü mansap koşulu) durumunda oluşan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

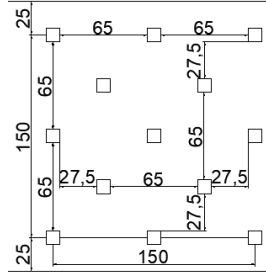
## 2. Deneysel Düzenek

Bu çalışmadaki deneyler, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi hidrolik laboratuvarında bulunan genişliği 2 m, uzunluğu 18 m ve derinliği 0,88 m olan dikdörtgen kesitli betonarme açık kanalda gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenek kanal ve ana kanala 45° açıyla bağlı 4,5 (sağ kol) ve 4,4 m (sol kol) uzunluğunda, 1 m genişliğinde ve 0,88 m derinliğinde yan kollardan oluşmaktadır. Boyutları Şekil 1'de verilen 200 cm genişliğe, 10 cm kret genişliğine, 30 cm yüksekliğe, 1:1,6 memba ve mansap eğimlerine sahip homojen dolgu barajlar, ek rezervuar haznesi amacına hizmet eden iki yan kolun birleşiminden 3 m sonra inşa edilmiştir. Baraj rezervuarı Şekil 1'de mavi renkle gösterilmiş olup bodrum katta bulunan depodaki su bir pompa yardımıyla üst kata iletilmiş ve rezervuar hacmi doldurulmuştur. Deneysel çalışmada herhangi bir kuyruk suyu mevcut olmadığından mansap koşulları kuru durumdadır. Deneylerin yapıldığı kanal tabanının betonarme olmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü mevcuttur.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen pürüzsüz olarak adlandırılan deneyde baraj mansabı boş bırakılmış [19], pürüzlü deneyde ise, yerleşimi simüle etmek amacıyla barajın mansap bölgesine 13 adet 10 cm x 10 cm x 10 cm'lik beton küp bloklar Şekil 2'deki gibi şaşırtmalı olarak yerleştirilmiştir. Şekil 1 detayında gösterildiği gibi küpler, vida yardımıyla zemine rijit olarak sabitlenmiştir.



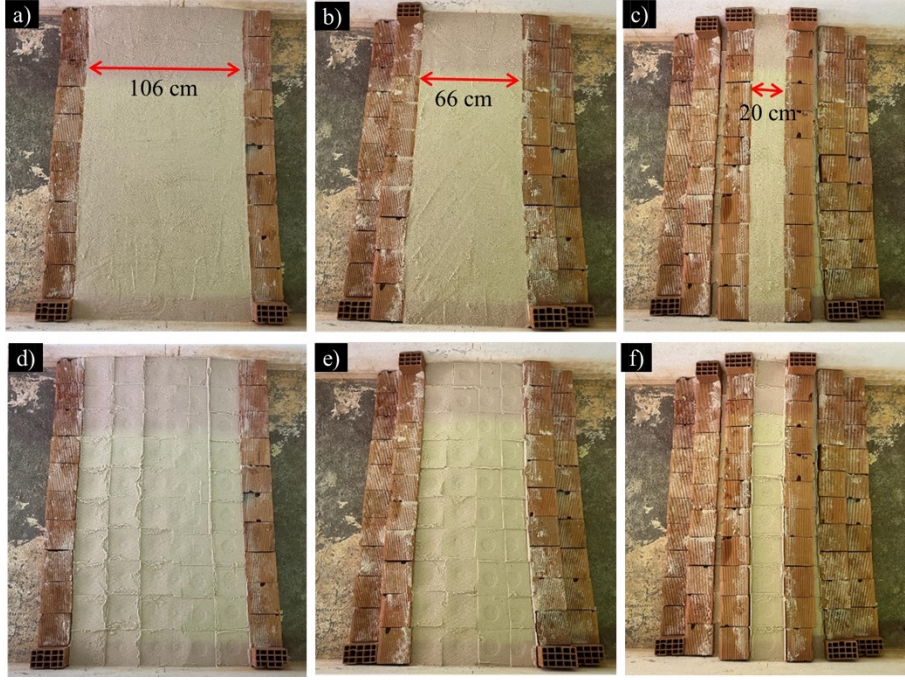
Şekil 1. Deneysel düzeneğin a) plan ve b) boyuna kesit görünümü (bütün birimler cm'dir.)



Şekil 2. Küp plan yerleşim detayı

### 3. Deneysel Yöntem

Pürüzlü deney için baraj gövdesi, [19]'da yapılan pürüzsüz deneydeki ile eşit boyutlarda ve aynı yöntem ile oluşturulmuştur. Baraj gövdesi, her bir katı 10 cm yüksekliğe sahip 3 kattan oluşmaktadır. Baraj gövdelerinin inşasında 0,441 mm medyan dane çapına sahip ( $d_{50}=0,441$  mm), yaklaşık 400 kg sediment kullanılmıştır. Şekil 3.a'da gösterildiği gibi barajın ilk katmanının memba ve mansap sınırlarını oluşturmak amacıyla birer sıra tuğla dizilmiş ve içi sediment ile doldurulmuştur. Standart sıkıştırma miktarını sağlayabilmek amacıyla ilk kat sedimenti yerleştirilip su terazisi ile düzlüğü kontrol edildikten sonra ve 1,5 kg ağırlık 20 cm yükseklikten 20 cm x 20 cm'lik levha üzerine 10 kez düşürülmüştür (Şekil 3.d). İkinci kat ve üçüncü kat için aynı işlemler tekrarlanmıştır. Baraj gövdesinin inşa aşamaları, sedimentin serildikten sonraki görüntüsü Şekil 3.a, Şekil 3.b ve Şekil 3.c'de, sıkıştırıldıktan sonraki durumu ise Şekil 3.d, Şekil 3.e, Şekil 3.f'de sunulmuştur [19].



Şekil 3. Baraj gövdesinin oluşturulması için sedimentin yerleştirilmesi a) 1. kat, b) 2. kat, c) 3. kat, sıkıştırılmış katmanlar d) 1.kat, e) 2. kat, f) 3. kat

Baraj gövdesi, 3. katın sıkıştırılması sonucu, yükseklik 30 cm'e ulaştığında, kademeli olarak inşa edilen baraj gövdesine 1:1,6 olan memba ve mansap eğiminin verilmesi ve 5 cm derinliğe sahip gediğin açılmasıyla hazır hale gelmiştir. (Şekil 4).



Şekil 4. Baraj gövdesi

Deneyden önce baraj rezervuarı doldurulurken baraj gövdesinin zarar görmemesi için plastik örtü serilmiştir ve su seviyesi gedik seviyesine ulaşana kadar baraj gövdesi bu örtüyle korunmuştur (Şekil 5). Rezervuardaki su seviyesi eşik seviyesine geldikten sonra örtü mansaba doğru yavaşça kaydırılarak çekilmiş ve deney düzeneğinden uzaklaştırılmıştır.

Baraj rezervuarındaki suyun gediği aşır baraj mansabına ulaştığı an deney başlangıcı ( $t=0$  s) olarak kabul edilmiştir. Deneyler, biri baraj gövdesini diğeri baraj mansabını göreceğ şekilde yerleştirilen 2 adet kamera (baraj gövdesini gören video çözünürlüğü 1080 piksel 30 fps olan GoPro Hero5, baraj mansabını gören video çözünürlüğü 720 piksel 30 fps olan bood aksiyon kamerası) ile kayıt altına alınmıştır. Ayrıca biri barajın membasında ( $x=-0,5$  m), diğeri ikisi barajın mansap bölgesinde ( $x=5$  m ve  $x=6,5$  m) yer alan ve kanalın sol duvarına

yapıştırılan 3 cetvelden zamana bağlı su derinlikleri telefonlar ile deney boyunca videoya alınmıştır. Bu videolardan 5 sn aralıklarla değerler okunarak su derinlikleri elde edilmiştir.

Deney sonunda, limnometre ile x ve y ekseninde 10 cm aralıklarla alınan ölçümler kullanılarak sediment yükseklik profilleri elde edilmiştir.



Şekil 5. Pürüzlü deneyde baraj gövdesinin son hali

#### 4. Deneysel Bulgular

Bu çalışma kapsamında, toprak dolgu barajların mansap bölgesinde yer alan yerleşim birimlerinin (13 adet küp) sediment taşınımı ve taşkın dalgası yayılımına etkisini belirleyebilmek için biri Taşkaya vd. [19]'un yapmış olduğu, diğeri bu çalışma kapsamında pürüzlü mansap koşulunda yapılan iki deneyden elde edilen veriler, baraj mansabına küplerin yerleştirildiği pürüzlü, yerleşim birimi olmayan pürüzsüz olarak tanımlanan deney olmak üzere, bu bölümde ele alınmıştır.

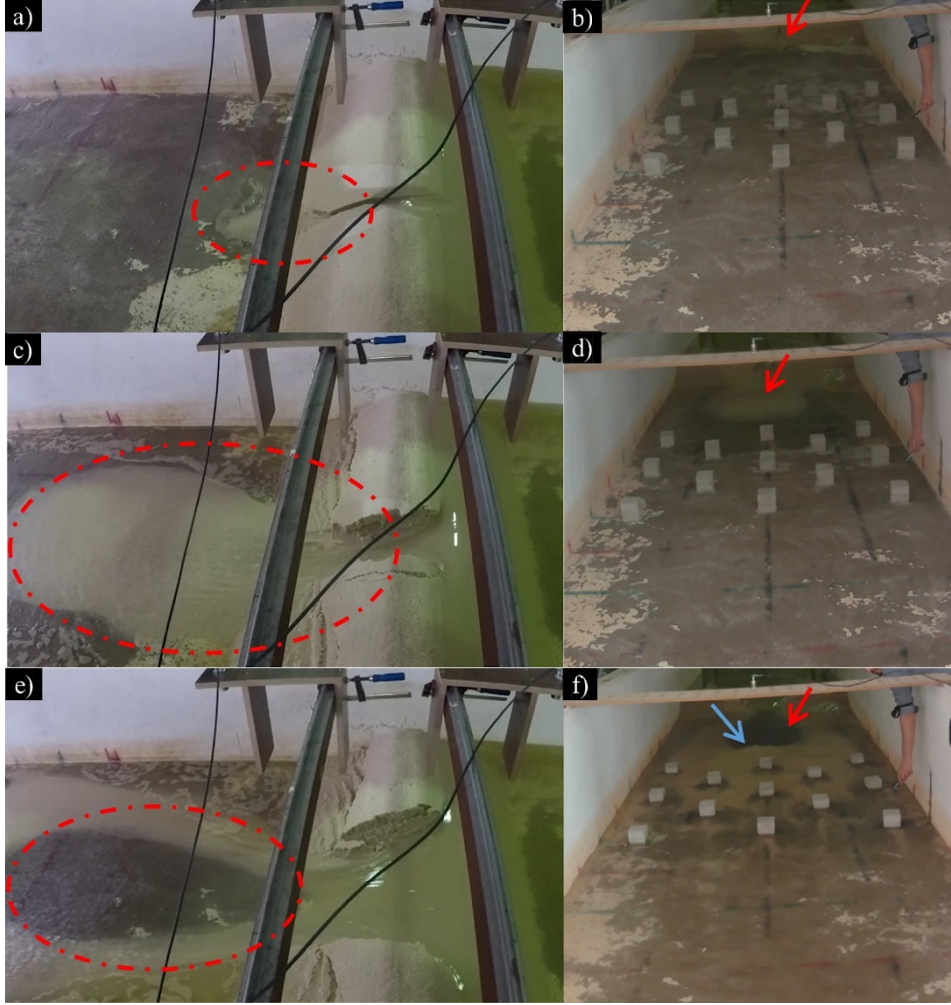
##### 4.1 Pürüzlü deney bulguları

Deney başlatılmadan önce baraj rezervuarı, su seviyesi gediğin mansap kısmına ulaşana kadar pompa yardımıyla kademeli olarak doldurulmuştur. Su seviyesinin maksimum değeri olan 25,3 cm'e gelmesi ile baraj membasındaki su hacmi 6,49 m<sup>3</sup>'e ulaşmıştır. Suyun gediği aşmasıyla (sarı ok ile gösterilen), t=0 s, pompa kapatılmış ve deney başlatılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Pürüzlü deney başlangıcı (t=0 s)

Şekil 7, sol taraftaki fotoğraflar baraj gövdesi, sağdakiler mansap kamerasından sırasıyla pürüzlü deney başladıktan 20, 50, 80 saniye sonra alınan görüntüleri göstermektedir. t=0 s anından itibaren, baraj gövdesinden su ile birlikte sediment taşınımı meydana gelmiştir (Şekil 7.a, Şekil 7.b) ve sediment yayılma bölgesinin uzunluğu ve genişliği zamanla artmıştır (Şekil 7.c, Şekil 7.d). Taşkın dalgasının etkisiyle yayılan sedimentte meydana gelen oyulmanın gelişmesi baraj mansabından yaklaşık 2 m uzaklıkta hidrolik sıçramaya neden olmuştur (Şekil 7.e, Şekil 7.f).



Şekil 7. Pürüzlü deneyde baraj gövdesi ve mansaptaki kameralardan kaydedilen görüntüler a)-b) 20. saniye, c)-d) 50. saniye, e)-f) 80. Saniye

Şekil 7’de sedimentin biriktiği ve oyulduğu bölgeler a, c, e görsellerinde kırmızı elipsle; b, d, f görsellerinde ise kırmızı okla gösterilmiştir. Mavi ok ise hidrolik sıçramanın olduğu bölgeyi işaret etmektedir.

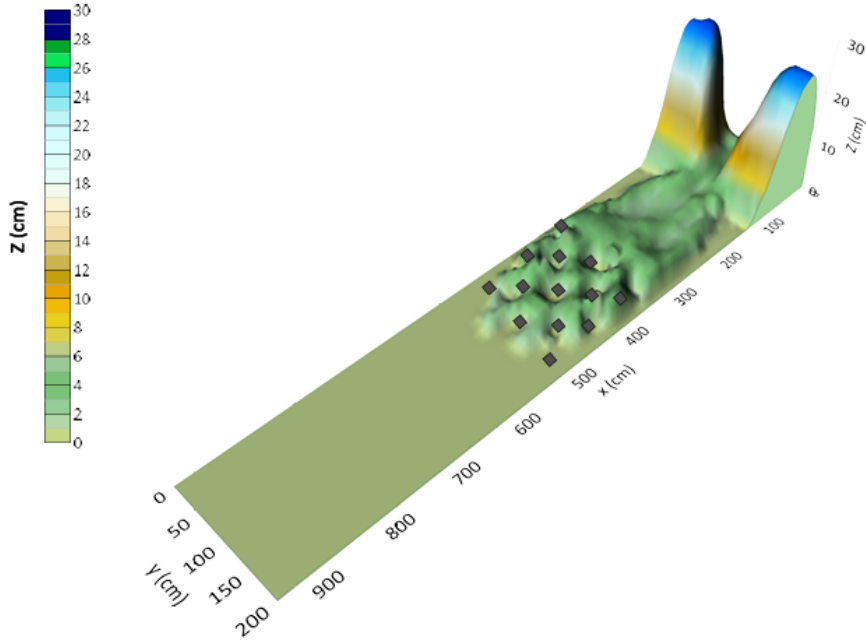
80. ve 116. saniyeler arasında şiddetini arttıran hidrolik sıçrama, 116. saniyede maksimum seviyeye ulaşmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Pürüzlü deneyde maksimum hidrolik sıçrama







Şekil 10. Pürüzlü deney sonunda taban batimetrisi

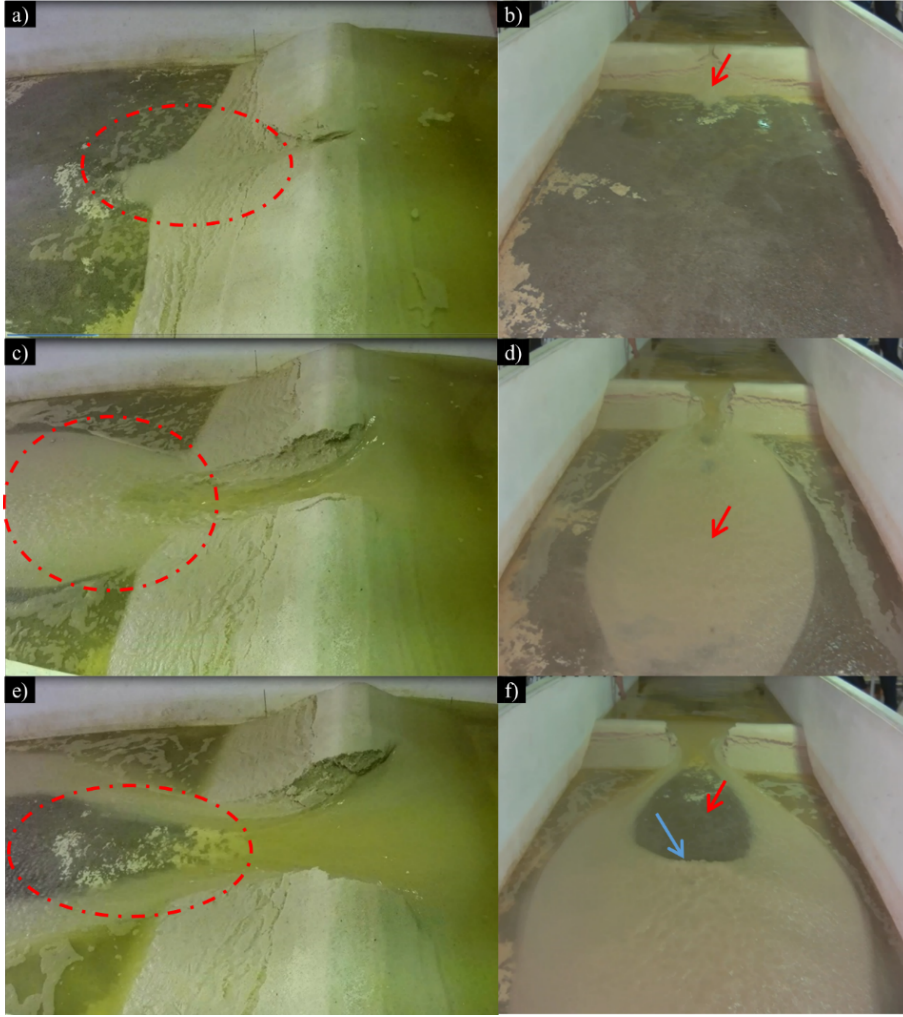
#### 4.2 Pürüzsüz deney bulguları

Deney başlangıcı pürüzlü durum ile aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Baraj membasındaki su seviyesinin maksimum değeri olan 25,7 cm'e gelmesi ile su hacmi 6,59 m<sup>3</sup>'e ulaşmıştır. Suyun gediği aştığı bu an (Şekil 11'de sarı ok ile gösterilmiştir), t=0 s olarak tanımlanmış, bu anda pompa kapatılmış ve deney başlatılmıştır.



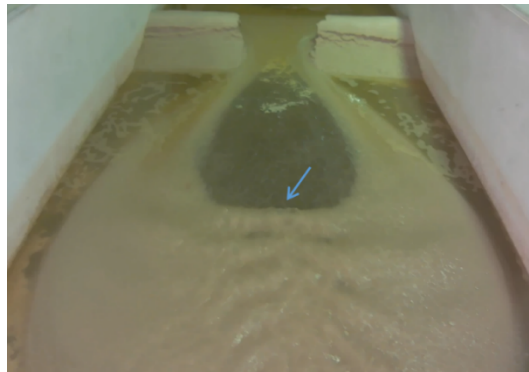
Şekil 11. Pürüzsüz deney başlangıcı (t=0 s)

Barajın ilk yıkılma anına ait görüntüler Şekil 12'de verilmiştir. Bu şekilde sol taraftaki fotoğraflar baraj gövdesi, sağ taraftakiler mansap kamerasından sırasıyla pürüzlü deney başladıktan 20 s, 50 s ve 70 s sonra alınan görüntüleri göstermektedir. Şekil 12.a ve Şekil 12.b'de gösterildiği gibi, t=0 s anından itibaren, gediğin genişlemesiyle baraj gövdesinden su ve sediment taşınımı meydana gelmiş ve ilk 1 dakika içinde yayılan sedimentin uzunluğu ve genişliği artmıştır (Şekil 12.c, Şekil 12.d). Taşkın dalgasının etkisiyle meydana gelen hidrolik sıçrama, yayılan sedimentte oyulmanın gelişmesine neden olmuştur (Şekil 12.e, Şekil 12.f). Şekil 12'de sedimentin biriktiği ve oyulduğu bölgeler a, c ve e görsellerinde kırmızı elipsle; a, d ve f görsellerinde ise kırmızı okla gösterilmiştir. Mavi ok ise hidrolik sıçramanın olduğu bölgeyi işaret etmektedir.



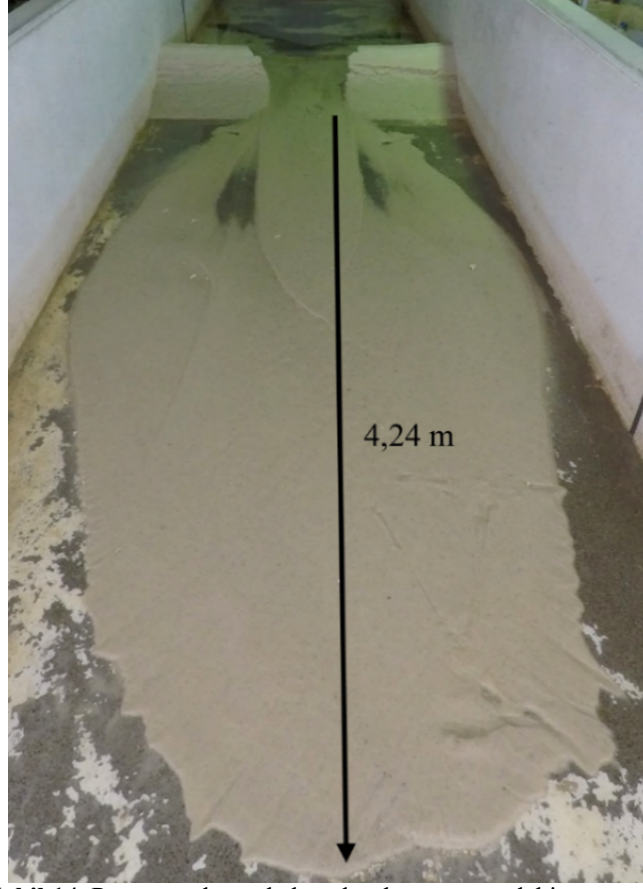
Şekil 12. Pürüzsüz deneyde baraj gövdesi ve mansaptaki kameralarından kaydedilen görüntüler a)-b) 20. saniye, c)-d) 50. saniye, e)-f) 70. saniye

Hidrolik sıçrama 70. ve 90. saniyeler arasında şiddetini arttırmış, 90. saniyede maksimum seviyeye ulaşmıştır (Şekil 13). Yıkılmanın 90. saniyesinden sonra taşkın dalgasının şiddetinin azalmasıyla hidrolik sıçramanın etkisi zamanla azalmış ve oyulmanın olduğu bölgelerde tekrar sediment birikmeye başlamıştır.



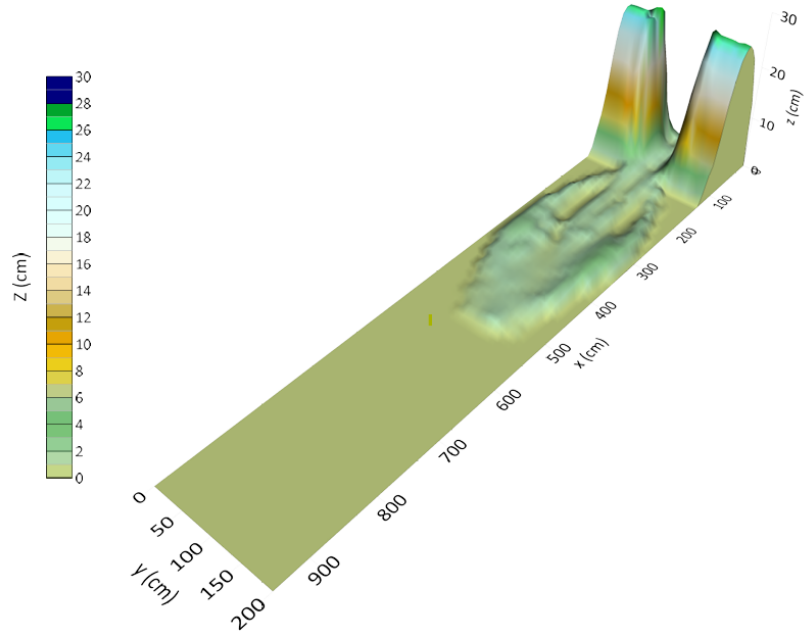
Şekil 13. Pürüzsüz deneyde maksimum hidrolik sıçrama

560 saniye sonunda sediment yayılımı nihai durumuna ulaşmıştır (Şekil 14). Sediment x ekseninde 4,24 m uzunluğunda yayılmıştır [19].



Şekil 14. Pürüzsüz deneyde kanalın deney sonundaki görünümü

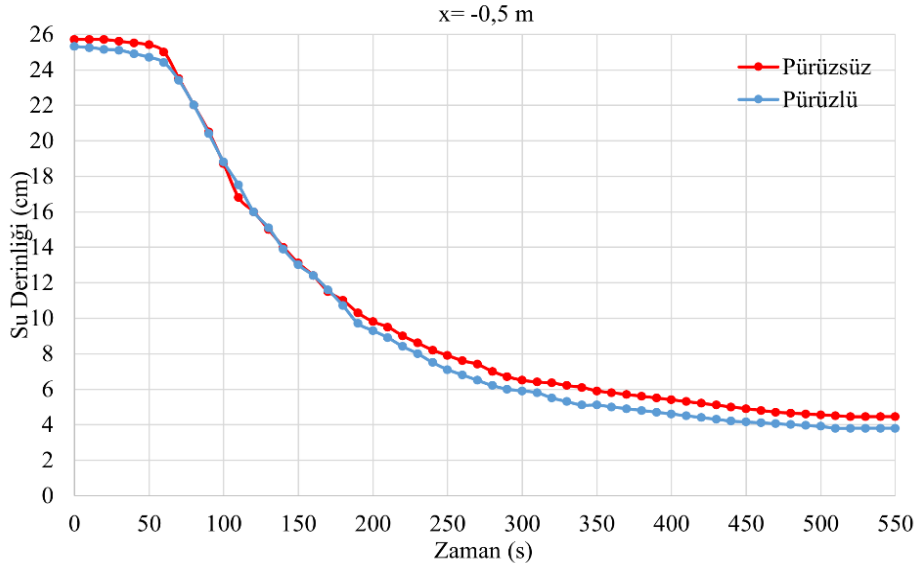
Kanal tabanından suyun çekilmesiyle yayılan sedimentin kalınlığı ölçülmüş ve elde edilen verilerle taban batimetrisi çıkarılmıştır (Şekil 15).



Şekil 15. Pürüzsüz deney sonunda taban batimetrisi

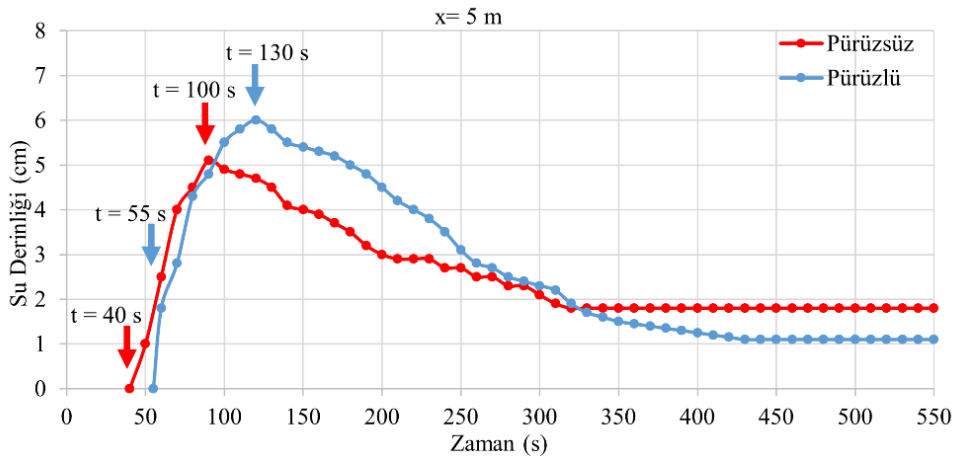
Barajın orta kısmı mansap bölgesine taşınırken, sağ ve sol tarafları ayakta kalmıştır. Mansap bölgesindeki maksimum sediment kalınlığı 4 cm olarak ölçülmüştür. Nihai durum incelendiğinde, baraj gövdesinden baraj mansabına taşınan sedimentin gövdeye yakın bölgede simetrik olarak yayıldığı; ilerideki bölgelerde ise kanal tabanının betonarme olmasına bağlı olarak tabandaki yüzey pürüzlülüğü, kanal tabanındaki düzensizlikler gibi nedenlerden kaynaklı tamamen simetrik olmadığı görülmektedir.

Şekil 16, pürüzlü ve pürüzsüz deneyde, rezervuar içinde  $x = -0,5$  m'de zamana bağlı su seviyesindeki değişimi göstermektedir. Deney süresi pürüzlü deneyde 550 saniye olup deney sonrası  $-0,5$  m'deki su seviyesi 3,8 cm'de sabitlenmiştir. Pürüzsüz deneyde ise deney süresi 560 saniyedir ve deney sonrası  $-0,5$  m'deki su seviyesi 4,4 cm'de sabitlenmiştir. İki deneyde baraj rezervuarındaki su seviyesindeki %1,5 civarı bir farklılık mevcut olup deneysel çalışmalar için kabul edilebilir bir mertebededir. Su seviyelerinin zamanla değişimindeki farklılık ise gedik açıklığının geometrisi ve gedik oluşma mekanizmasının farklı gelişmesiyle açıklanmaktadır.



Şekil 16.  $x = -0,5$  m'de rezervuardaki su seviyesinin zamana bağlı değişimi

Şekil 17, pürüzlü ve pürüzsüz deneyde,  $x = 5$  m'de su seviyesindeki zamana bağlı değişimi göstermektedir. Deney başladıktan sonra pürüzlü ve pürüzsüz deneyde  $x = 5$  m'ye suyun ulaşma süreleri sırasıyla 55 s ve 40 s; maksimum su seviyeleri 6 cm ve 5,1 cm; deney sonu su seviyeleri 1,1 cm ve 1,8 cm olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilere göre taşkın dalgası, pürüzlü deneyde  $x = 5$  m'deki cetvele daha geç ulaşmakla beraber daha yüksek seviyelere çıkmıştır. Pürüzsüz deneyde maksimum seviyeye ulaşması daha az zaman almıştır.



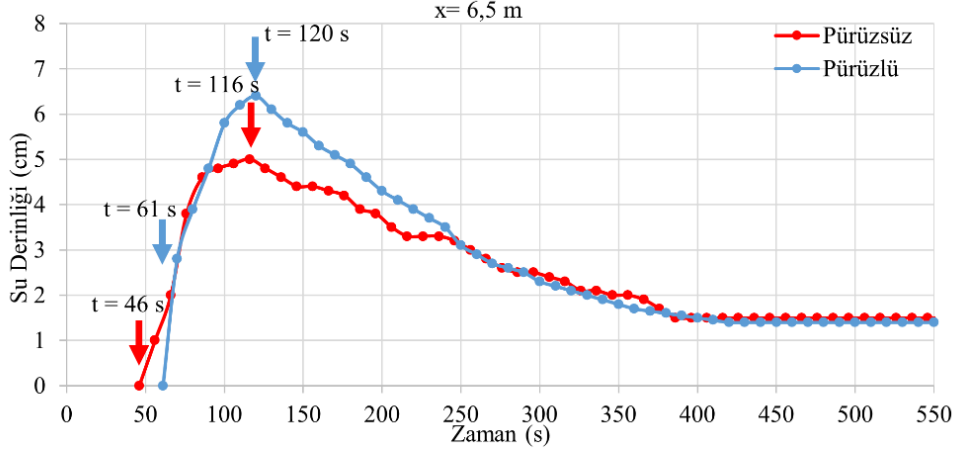
Şekil 17.  $x = 5$  m'de su seviyesinin zamana bağlı değişimi

Şekil 18, pürüzlü ve pürüzsüz deneyde, 6,5 m'de bulunan cetvellere zamana bağlı su seviyesindeki değişimi eş zamanlı olarak göstermektedir. Deney başladıktan sonra pürüzlü ve pürüzsüz deneyde cetvellere suyun

ulaşma süreleri sırasıyla 61 sn ve 46 sn; maksimum su seviyeleri 6,4 cm ve 5 cm; deney sonu su seviyeleri 1,4 cm ve 1,5 cm olarak elde edilmiştir.

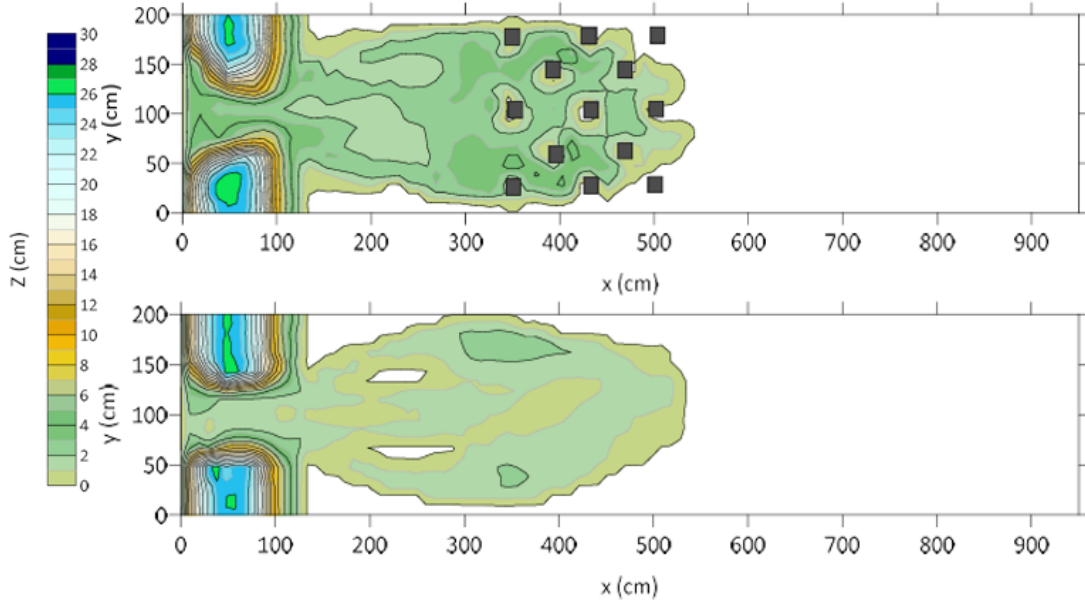
Şekil 18 incelendiğinde, taşkın dalgasının pürüzsüz deneyde  $x=6,5$  m'deki cetvele daha hızlı ilerlediği, ulaştığı maksimum seviyenin ise pürüzlü deneyde daha yüksek olduğu görülmektedir.

Pürüzlü deneyde engellere çarpan akımın hızı azalmış ve bu nedenle cetvele ulaşma anı gecikmiştir.



Şekil 18.  $x=6,5$  m'de su seviyesinin zamana bağlı değişimi

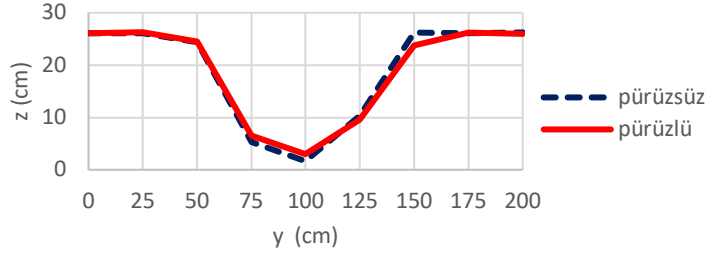
Nihai durumda tabandaki sedimenti gösteren kontür grafikleri Şekil 19'da verilmiştir. [16]'ya benzer olarak barajların sağ ve sol tarafları ayakta kalırken orta kısmı mansap bölgesine taşınmıştır. Barajdan taşınan sedimentin x ve y yönündeki yayılım miktarı göz önüne alınılığında taşkın dalgasının x eksenindeki hızının y eksenine göre daha fazla olduğu açıkça görülmektedir [13]. Pürüzlü deneyde mevcut küplerin taşkın dalgası hızını azalttığı Şekil 17 ve Şekil 18'de cetvellere suyun ulaşma zamanından görülmektedir. Ancak gedik oluşum mekanizması ve gedik son boyutundaki farklılıklar taşkın dalgasının özelliklerini etkilemiş ve bu durum sediment yayılım uzunluğunun baraj mansabında yerleşim olduğu deneyde daha fazla olmasıyla sonuçlanmıştır. Ayrıca, Şekil 9'da kanalın 5. metresindeki küplerin sonundaki sediment yayılımına bakıldığında, bu bölgede yayılan sedimentin kalınlığının çok az ve yayılımın kısmi olduğu görülmektedir.



Şekil 19. Deney sonunda kanal boyunca yayılan sedimentin kontür grafiği a) pürüzlü, b) pürüzsüz koşul

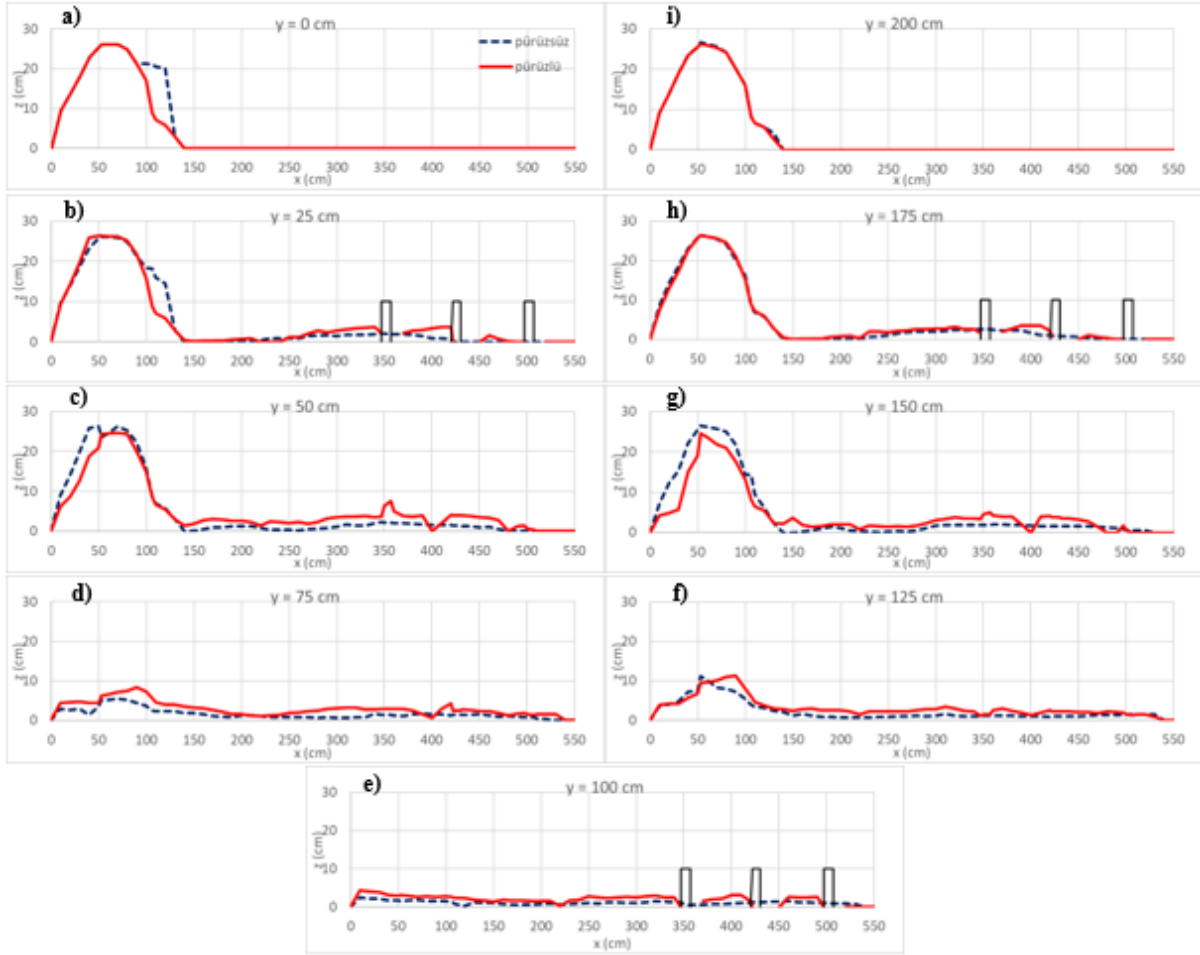
Şekil 20'de kret eksenindeki ( $x=53$  cm) gedik son boyutları gösterilmiştir. İki deneyde gedik açıklığının sağ eğimi üst üste çıkmasına rağmen sol eğim benzer değildir. [11]'de belirtildiği gibi deneyler aynı koşullar altında

yapılsa bile baraj son boyutlarının aynı olmamasını, sızma koşulları ve sıvı sediment etkileşimi parametrelerindeki farklılıklar açıklamaktadır.



Şekil 20. x=53 cm'de baraj en kesiti

Deney sonunda 25 cm'de bir elde edilen, sediment kalınlığını gösteren, boyuna profiller her iki durum için de Şekil 21'de sunulmuştur.



Şekil 21. Boyuna sediment yüksekliği profilleri a) y=0 cm, b) y=25 cm, c) y=50 cm, d) y=75 cm, e) y=100 cm, f) y=125 cm, g) y=150 cm, h) y=175 cm, i) y=200 cm

Taşkaya vd. [16]'nın çalışmasına benzer olarak, mansapta bulunan beton bloklar, bu bölgeye yayılan sediment kalınlığının artmasına sebebiyet vermiştir. Şekil 21'de de görüldüğü üzere deneylerin ikisinde de kret üzerindeki gedğin genişlemesiyle taşkın dalgasıyla barajın orta bölümü taşınmış, sağ ve sol tarafı ayakta kalmıştır.

Pürüzlü ve pürüzsüz deneyde deney başlangıcından, t=0 s, deney sonuna kadar olan sediment yayılma süreciyle ilgili zamanlar, cetvel okumaları ve deney sonundaki geometrik özelliklerin karşılaştırılması Tablo 1'de

verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, pürüzlü deneyde barajın %6,7, pürüzsüz deneyde ise %17,7'lik hacmi taşkın dalgasının etkisiyle mansap bölgesine yayılmıştır.

**Tablo 1.** Deney sonuçlarının karşılaştırılması

Özellik	Pürüzlü Mansap	Pürüzsüz Mansap
Rezervuarda maksimum su seviyesi (cm)	25,3	25,7
Rezervuarda maksimum su hacmi (m <sup>3</sup> )	6,49	6,59
Rezervuarda deney sonu su seviyesi (cm)	3,8	4,4
Suyun 5 m' deki cetvele ulaşması (s)	55	40
Suyun 6 m'deki cetvele ulaşması (s)	61	46
Toplam yıkılma süresi (s)	550	560
Hidrolik sıçramanın başlangıcı (s)	80	70
Maksimum hidrolik sıçramanın oluşması (s)	116	90
5 m' deki maksimum su seviyesi ve zamanı (cm-s)	6,0-120	5,1-90
6 m' deki maksimum su seviyesi ve zamanı (cm-s)	6,4-120	5,0-120
5 m' de deney sonu su seviyesi (cm)	1,1	1,8
6 m' de deney sonu su seviyesi (cm)	1,4	1,5
Barajın başlangıç hacmi (cm <sup>3</sup> )	348000	348000
Barajın son hacmi (0-106 cm) (cm <sup>3</sup> )	286425	286522
Sediment yayılım uzunluğu (cm)	420	424
Sediment yayılım genişliği (cm)	180	190
Sediment yayılım ortalama yüksekliği (cm)	2,4	1,8
Sediment yayılım maksimum yüksekliği (cm)	6,7	4,0

## 5. Sonuçlar

Barajların mansap bölgesinde yer alan mevcut yerleşim birimlerinde baraj yıkılması sonucu oluşabilecek risklerin belirlenmesi ve önlenmesi açısından taşkın hareketlerinin saptanması önemli bir konudur. Bu deneysel çalışmada, baraj mansabına küplerin yerleştirildiği pürüzlü ve engellerin olmadığı pürüzsüz mansaba sahip homojen toprak dolgu barajların yıkılma senaryosu incelenmiştir. Pürüzlü ve pürüzsüz deneyde sırasıyla membadaki su seviyesi maksimum 25,3 cm, 25,7 cm'e ulaşmıştır. Rezervuardaki su hacimlerinin maksimum değerleri ise sırasıyla 6,49 m<sup>3</sup> ve 6,59 m<sup>3</sup>'tür. Bu nedenle pürüzlü ve pürüzsüz deneylerde rezervuar başlangıç koşulları eşdeğer kabul edilmiştir. Su seviyesinin gediği aşmasıyla deney başlamış olup, (t=0 s), pürüzlü deney 550 s, pürüzlü deney ise 560 s sürmüştür. Her iki deneyde de zamanla genişleyen gedik, taşınan sedimentin yayılım hızını arttırmıştır. Membadaki su seviyesi pürüzlü ve pürüzsüz deneyde sırasıyla %84,98 ve %82,88 azalmıştır. Küplerin etkisiyle baraj mansabındaki cetvellerden okunan taşkın dalgası derinlikleri artmıştır. Cetvellerdeki maksimum derinlikler, 5 ve 6,5 m'de sırasıyla memba su seviyesinin pürüzsüz deneyde %19,8 ve %19,5'i iken pürüzlü deneyde küplerin etkisiyle artarak %23,7'sine ve %25,3'üne ulaşmıştır. Baraj mansabında yerleşim yerini simüle eden küplerin olması, taşkın dalgasının hızını azaltmış ve cetvele ulaşma süresi arttırmıştır. Ayrıca, yerleşim bölgesini simüle eden küplerden, baraj mansabına yakın bölgedeki kanal ortasında taşkını ilk karşılayan engel, taşkın dalgası sebebiyle tamamen, diğerleri ise kısmi olarak su altında kalmıştır. Köprü ayağına benzer olarak küplerin memba ve mansap bölgelerinde oyulmalar ve birikmeler meydana gelmiştir. Bu birikmelere bağlı olarak yayılan sediment kalınlığı pürüzlü deneyde artmıştır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M959 numaralı Proje ile desteklenmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Urzica A, Pintilie AM, Stoleriu CC, Cîmpianu CI, Hutanu E, Pricop CI, Grozavu A. Using 2D HEC-RAS Modelling and Embankment Dam Break Scenario for Assessing the Flood Control Capacity of a Multi-Reservoir System (NE Romania). *Water* 2020; 13(1): 57.
- [2] Alppay H. Baraj Yıkılması Taşkın Risk Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2020.
- [3] Costa JE. Floods From Dam Failures. Open File Report 85-560, US Geological Survey: Denver, CO, USA, 1985; 1-54.
- [4] Palamut Kemaloğlu N, Baduna Koçyiğit M, Akay H. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılımının 1-Boyutlu Sayısal Simülasyonlarla İncelenmesi: Rahmanlar Barajı Örneği. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part (C) Tasarım ve Teknoloji* 2019; 7(1): 97-111.
- [5] Palamut N. Baraj Yıkılma Analizi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [6] Tingsanchai T, Chinnarasri C. Numerical Modelling of Dam Failure Due to Flow Overtopping. *Hydrol. Sci. J.* 2001; 46 (1): 113-130.
- [7] Güney MŞ, Tayfur G, Bombar G, Elçi Ş. Distorted Physical Model to Study Sudden Partial Dam Break Flows in an Urban Area. *J. Hydraul. Eng* 2014; 140 (11).
- [8] Cao Z, Pender G, Wallis S, Carling P. Computational Dam-Break Hydraulics over Erodible Sediment Bed. *J. Hydraul. Eng.* 2004; 130 (7): 689-703.
- [9] Paşa Y, Peker İB, Hacı A, Gülbaz S. Dam Failure Analysis and Flood Disaster Simulation under Various Scenarios. *Water Science & Technology* 2023; 87(5): 1214-1231.
- [10] Najar M, Gül A. Investigating the Influence of Dam-Breach Parameters on Dam-Break Connected Flood Hydrograph. *Teknik Dergi* 2022; 692: 12501-12524.
- [11] Singh VP, Scarlatos PD. Breach Erosion of Earthfill Dams and Flood Routing: BEED Model. Research Report, Army Research Office, Battelle, Research Triangle Park, 1985; North Carolina. 131.
- [12] Yılmaz K, Darama Y, Oruç Y, Melek AB. Assessment of Flood Hazards Due to Overtopping and Piping in Dalaman Akköprü Dam, Employing both Shallow Water Flow and Diffusive Wave Equations. *Natural Hazards* 2023; 117: 979-1003.
- [13] Kocaman S., Güzel H. Baraj Yıkılması Taşkın Dalgası Yayılımının 3-Boyutlu Deneysel ve Nümerik Karşılaştırılması. *Engineering Sciences* 2011; 6(1): 406-414.
- [14] Topçu E, Bağrıaçık B, Erdağ A. Bir Dolgu Barajın Rezervuarındaki Suyun Ani Çekilmesi Sırasındaki Stabilitate Analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 2022; 10(1): 50-60.
- [15] Taşkaya E, Büyüker Z, Öztürk B, Bombar G, Tayfur G. Overtopping Failure of a Homogeneous Earth-Fill Dam with Two Different Breach Sizes and Rough Downstream Condition. *River Flow 2022 The 11th International Conference on Fluvial Hydraulics*; 8-9 November 2022; Ottawa-Kanada.
- [16] Taşkaya E, Bombar G, Tayfur G. Experimental Investigation of Sediment Movement as a Result of Homogeneous Earth-Fill Dam Overtopping Break over a Simplified Urban Area. *J. Hydrol.* 2023; 617 (B).
- [17] Zhang LM, Xu Y, Jia JS. Analysis of Earth Dam Failures: A Database Approach. *Georisk* 2009; 3(3): 184-189.
- [18] Kocaman S. Baraj Yıkılması Analizi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2002.
- [19] Taşkaya E, Bombar G, Tayfur G. Experimental Investigation of a Failure of a Homogeneous Earthen Dam by Overtopping. *14th International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE*; 6-8 September 2021; İstanbul-Türkiye. 750-756.



## Acoustic Evaluation of Trabzon Beşirli Central Tennis Court Multi-Purpose Hall

Ayşegül KANDEMİR<sup>1</sup>, Mustafa KAVRAZ<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Mimarlık Bölümü, Mimarlık Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

<sup>1</sup>a.kandemir96@gmail.com, <sup>2</sup>\*mkavraz@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 29/10/2023;

Kabul/Accepted: 19/03/2024)

**Abstract:** Today, although acoustic designs for different purposes are not realized in sports halls designed for sports activities, these halls are widely used for various events such as conferences and concerts. In this study; The main activity area in the Beşirli Central Tennis Court building, which was built for sports activities within the scope of the European Youth Games in Trabzon Province, was evaluated in terms of acoustics for different functional uses by computer simulation method. First of all, 3D models were prepared for the current conditions of the main sports event areas according to different audience occupancy rates. Then the models were transferred to the simulation program to evaluate the objective parameters of the sound. After obtaining the objective parameter values of the sound, 3D models of the hall were prepared again with the sound-absorbing mechanisms placed between the existing steel structural system on the ceiling plane of the hall, designed for the realization of sports, music and speech activities in the sports activity areas. The prepared 3D models were transferred to the ODEON V10 program and the simulation process was repeated. As a result of all simulations, the values of the objective parameters of the sound obtained for indoor sports activity areas were compared and evaluated with each other and the accepted optimum value ranges.

**Key words:** Indoor Sports Hall, Acoustics, ODEON, Objective Parameters of Sound.

### Trabzon Beşirli Merkez Tenis Kortu Çok Amaçlı Salonunun Akustik Değerlendirmesi

**Öz:** Günümüzde sportif faaliyetlere yönelik tasarlanmış spor salonlarında farklı kullanım amaçları için akustik tasarımlar gerçekleştirilmemesine rağmen bu salonlar konferans ve konser gibi çeşitli etkinlikler için yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada; Trabzon İli, Avrupa Gençlik Oyunları kapsamında sportif etkinlikler için inşa edilen Beşirli Merkez Tenis Kortu binasındaki ana etkinlik alanı bilgisayar simülasyon yöntemi ile farklı fonksiyonel kullanımlar için akustik açıdan değerlendirilmiştir. Öncelikle ana spor etkinlik alanlarının mevcut durumları için farklı seyirci doluluk oranlarına göre 3D modelleri hazırlanmıştır. Daha sonra modeller sesin nesnel parametrelerinin değerlendirilmesi için simülasyon programına aktarılmıştır. Sesin nesnel parametre değerleri elde edildikten sonra spor etkinlik alanlarında spor, müzik ve konuşma faaliyetlerinin gerçekleştirilmesine yönelik tasarlanan, salonun tavan düzlemindeki mevcut taşıyıcı elemanların arasına yerleştirilen ses yutucu özellikteki mekanizmalar ile yeniden salona ait 3D modeller hazırlanmıştır. Hazırlanan 3D modeller ODEON V10 programına aktararak simülasyon işlemi tekrarlanmıştır. Tüm simülasyonlar sonucunda kapalı spor etkinlik alanları için elde edilen sesin nesnel parametrelerine ilişkin değerler birbirleri ve kabul edilen optimum değer aralıkları ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kapalı Spor Salonu, Akustik, ODEON, Sesin Nesnel Parametreleri.

## 1. Introduction

Today, venues designed for sports activities, from Olympic stadiums to city-scale sports halls, are also widely used for different events such as congresses, conferences and concerts [1]. Such venues have large volume and high audience capacities that allow the specified activities to be held. When these spaces used for sports and multi-purpose activities are evaluated in general, it is seen that they are not suitable for the perception of sound under optimum conditions.

In the construction of sports halls, materials such as concrete, steel, glass, etc. that form hard and smooth/smooth surfaces are used. Although these materials meet the needs in terms of structure, they negatively affect the intelligibility of sound due to their low sound absorption properties. The high resonance environment, which is caused by the large volume of these halls, the use of materials with low sound absorption on their surfaces and the fact that they usually have a small number of spectators, causes the communication in these spaces to be difficult and tiring [2]. These unfavorable acoustic conditions prevent the activities from being carried out in healthy conditions and the salons from being used efficiently [3]. The purpose of the acoustic design of the spaces is to provide auditory comfort depending on the functions. In this context, acoustic arrangements should be made during the design phase depending on the functions of the spaces. This can be achieved either by volumetric change or material change on the surfaces in the spaces whose design has been completed or in the spaces whose

\* Sorumlu yazar: [mkavraz@ktu.edu.tr](mailto:mkavraz@ktu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7059-9018, <sup>2</sup> 0000-0001-9556-1916

application has been completed. This can be achieved either by volumetric change or material change on the surfaces in the spaces whose design has been completed or in the spaces whose application has been completed [3,4].

Within the scope of the study, literature studies including acoustic examinations of the spaces used for different functions were examined. In the study titled "Improving the Acoustic Qualities of Type Sports Halls for Multipurpose Uses", it was aimed to determine the acoustic performance of these halls since the type sports halls organized by the Ministry of National Education are also used in activities with different functions. Within the scope of the study, the objective parameters of the sound obtained at medium frequencies with the Odeon Combined 8.5 simulation program were examined [1]. Within the scope of his study titled "Investigation of Acoustic Performance in Multipurpose Use of Sports Halls through Material and Design Variables", Tekin designed a sports hall with a volume of 34,000m<sup>3</sup> and a capacity of 3,468 people by using the gymnasium designs in the literature. Separate design scenarios were developed for classical music and amplified music activities of the designed hall and models were prepared. The objective parameter values of the variations prepared according to music types and sports activities were obtained with the Odeon program and compared with each other [5]. In his study titled "Evaluation of Volume Acoustics of Antalya Glass Pyramid by Computer Simulation Method", Balcı aimed to investigate the acoustic performance of Antalya Glass Pyramid with 7,000m<sup>2</sup> glass curtain wall. Although the venue is designed for multi-purpose use such as speaking (congress) and music (concert), improvement suggestions have been developed by determining from the acoustic parameters obtained that the volume does not have the acoustic competence to support multi-purpose uses [6]. Şimşek (2020) examined and evaluated the 421-person multipurpose hall of Anadolu University, where concerts, conferences, theaters and cinema events can be held, in his study titled "Interchangeable Acoustic Design in Multipurpose Halls: The Case of Cinema Anatolian Multipurpose Hall". The acoustic objective parameters of the current condition of the hall were obtained with the Odeon simulation program and compared with the optimum values in the literature [7]. In his study titled "The Acoustic Characteristics of the Bazaar Mosque in Trabzon, Turkey", Kavraz examined the acoustic properties of the Bazaar Mosque in Trabzon with the computer simulation method (Odeon). Objective parameter values for the scenarios designed according to the current status of the mosque, the status of its walls covered with wood and different mosque occupancy rates were obtained and examined with the Odeon program. The acoustic performance of the mosque was evaluated according to the objective parameters RT, D50, EDT, LF and C80 [8]. Aktı (2014), "Acoustics in Multi-Purpose Halls with Apartment Plan and Dome Finish Examining Performance in the Simulation Program Through Design Variables", if the same hall is used for music and speech activities, he presented hall plan type suggestions in order to provide optimum acoustic conditions for both functions. EDT, T30, C80, D50, Ts, LF80, G and STI parameters were evaluated during music and speech activities in the hall for the prepared proposal plan type [9]. Demirel (2018) "Acoustic Design of Sivas Cultural Center Multi-Purpose Hall" analyzed and evaluated the acoustic improvement scenarios in order to provide acoustic conditions for different functions such as conferences, concerts, operas/theaters in the same volume. Within the scope of the study, T30, EDT, STI, SPL, D50 parameters were examined [10].

## 2. Material and Method

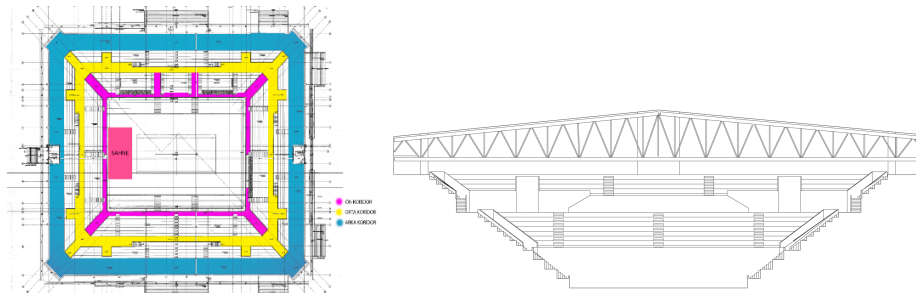
The aim of the study is to evaluate the acoustic conditions of the main sports event venue of Beşirli Central Tennis Court building in the city of Trabzon in line with the suggestions made in the current and ceiling plane. The quantitative values of the objective parameters of the sound in which the evaluations were performed were obtained through the Odeon Combined Version 10.1 computer program. As a result of the analyzes carried out for the current situation within the scope of the study, first of all, suggestions were made to improve the acoustic conditions of the hall, and then these suggestions were evaluated in terms of acoustics. In the suggestions made, the current function of the hall, the three-dimensional visual perceptions of the spaces and the steel structural system in the roof plane were taken into account. Considering the floor heights between the current steel structural system of the sports hall, prismatic mechanisms with covers are designed, the inner surfaces of which can be hung on the ceiling surfaces in a way that does not adversely affect the field of view of the audience, and the outer surfaces are covered with sound-reflective materials. Scenarios have been created for cases where the mechanism covers are 90° open, 45° open, closed and the mechanisms are without a cover, and cases where the audience area of the sports hall is empty and half full. For the scenarios created, measurements were made in the simulation program and the objective parameters of the sound for the hall were obtained and evaluated. While the sound absorbing surface area increases when the covers of the prismatic mechanisms are opened, the sound reflecting surface area increases when they are closed. 3D models of the scenarios designed according to the cover movements were created in the Sketchup 2022 program and transferred to the Odeon Combined Version 10.1

program and the objective parameter values of the sound were obtained. The contribution of the arrangements to the improvement of the acoustic conditions of the hall was analyzed by comparing them with the optimum values in the literature. Within the scope of the study, the basic evaluation criteria used acoustically in the sports hall are Reverberation Time (T30), Early Decay Time (EDT), Definition (D50), Clarity (C80), Early Lateral Fraction (LF80) and Speech Transmission Index (STI).

In the examined sports hall, both sports activities and different activities with speech or music content are organized. While music and speech events are organized from the 8 m x 15 m stage area, which can be dismantled and installed on the tennis court at Beşirli Merkez Tennis Court, music plays and speeches are held during sports activities. The contributions of the arrangements to improve the acoustic conditions of the hall were analyzed by comparing them with the optimum values in the literature.

## 2.1. Beşirli Tennis Complex

Tennis complex was built by the Ministry of Youth and Sports for the European Youth Olympic Games (EYOF) in the Ortahisar district of Trabzon in 2011. The complex, which consists of 1 open central court, 3 closed courts, 12 open courts and 1 children's court, was the largest sports complex in Turkey at the time of its construction [11]. Due to the need for a sports hall in the city in the process, the Central Tennis Court was closed with a steel roof in 2018 and transformed into a multi-purpose sports hall without losing its main function, the tennis court [12]. The multi-purpose sports hall with a size of 42x27 meters, a closed area of 7,760 m<sup>2</sup> and a capacity of 3500 people is designed for the organization of international and local competitions. The hall is suitable for handball, volleyball, tennis competitions [12]. In order to carry out multi-purpose activities in the existing hall within the scope of the study, an 8x15 m dimensions and 0,30 m high, removable wooden stage was added to the hall (Figure 1).



**Figure 1.** Spectator area and stage layout and section of Beşirli Central Tennis Court [13]

Depending on the occupancy rates, two different scenarios were designed for the hall. These scenarios, which are created according to the occupancy rates of the hall, are situations where the audience seating areas are empty and the audience seating areas are %50 full. For the situation where the hall is half full, the middle corridor separating the audience areas is taken as reference. Spectator areas between the playing field and the central corridor were considered as full, while the spectator areas between the central corridor and the rear corridor were considered as empty.

## 2.2. Acceptances for applications on the ceiling surface

In order to optimize the high reverberation time, prismatic mechanisms with openable and closed covers, whose inner surfaces are sound-absorbing and whose outer surfaces are covered with sound-reflective material, have been placed between the existing steel structural system on the ceiling surfaces of the hall. The proposed prismatic mechanisms are placed perpendicular to the long facades of the hall (Figure 2). The outer surfaces of the mechanisms are made of 30 mm thick MDF coating and the MDF coatings are mounted to each other with screws. The inner surfaces of the mechanisms whose outer surfaces are formed are covered with double layer of rock wool, which is a sound-absorbing material. The rock wool sheets used are each 70 mm and 80 mm thick. The faces of the rock wool sheets were covered with vinyl to protect them from dust and dirt (Figure 2).

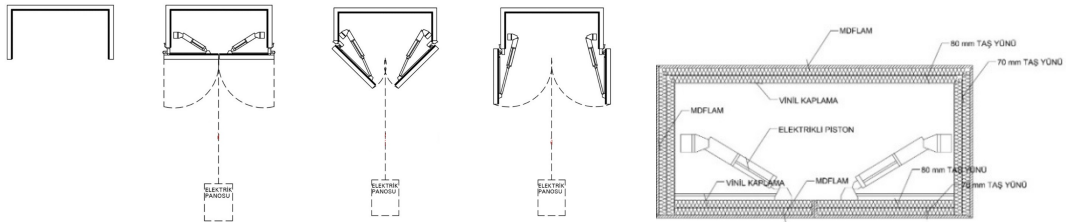


Figure 2. Cover movements of prismatic mechanisms and material detail of mechanisms

### 2.3. Acceptances for mechanisms mounted on the roof surface on the tennis court

The tennis court, which is evaluated in terms of the auditory perception of the sound, has an area of 3.682 m<sup>2</sup> and its floor height varies from 4 m to 18.86 m. The distance between the prismatic mechanisms of 2.6x2.6x1.5 m. dimensions placed between the steel structural system on the ceiling surface is 0.2 m. Figure 3 shows the sections of the scenarios where the prismatic mechanism covers placed on the ceiling surface of the tennis court are 90° and 45° open, the covers are completely closed and without a cover (Figure 3).

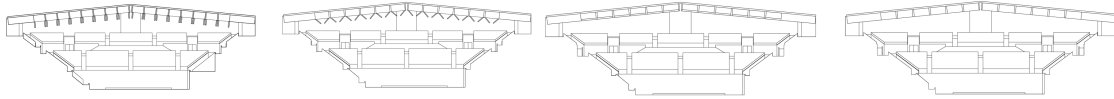


Figure 3. Situations where the covers are 90° open, 45° open, closed and without covers

### 2.4. Acceptance of Surface Materials

Material assignments were made by selecting materials from the material library of the simulation program (Odeon Combined Vesion 10.1) for new 3D models arranged in line with the status and acoustic recommendations in sports structures [14]. Materials not available in the Odeon material library were added to the material list by conducting a scientific literature search (Table 1). The sound absorption coefficients of the surfaces of the prismatic mechanisms placed on the ceiling surface in the hall are given in Table 2.

Table 1. Sound absorption coefficients of Beşirli Tennis Court surface materials

Surface	Material	Material Code (Odeon)	Sound Absorption Coefficients							
			63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Walls	Plaster+Paint	4002	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Window	Double Glazing	10004	0,15	0,15	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
Door	Iron Door	[15]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,02	0,02
Parapet	Marble Parapet	2001	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Spectators area	Epoxy Floor Coating	6000	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
Stage	Wooden Stage	3004	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07
Roof	Steel Roof	[15]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04	0,02	0,02
Spectator Chair	Plastic Seat	[16]	0,10	0,06	0,10	0,10	0,20	0,30	0,20	0,20
Vip Spectator Chair	Fabric Seat	11006	0,44	0,44	0,6	0,77	0,89	0,82	0,70	0,70
Audience-1	Plastic seat + Spectator	11009	0,51	0,51	0,64	0,75	0,80	0,82	0,83	0,83
Audience-2	Fabric Seat Spectator	11007	0,72	0,72	0,80	0,86	0,89	0,9	0,9	0,9
Field	Epoxy Floor Coating	6000	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05

**Table 2.** Sound retention coefficients of the surfaces of prismatic mechanisms placed on the ceiling surface as an acoustic improvement proposal

Surface	Material	Material Code (Odeon)	Sound Absorption Coefficients							
			63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Sound Absorber	Rock wool+ Vinyl	[17]	0,57	0,57	0,79	0,77	0,9	0,71	0,47	0,47
Sound reflective	MDF	3063	0,42	0,42	0,21	0,10	0,08	0,06	0,06	0,06

Audio source locations in the hall; The audio source has been selected as omnidirectional, which ensures that the sound is distributed equally in all directions. The sound sources in the hall are placed on the stage and 150 cm above the ground plane.

## 2.5. Accepted ranges of optimum values for the objective parameters of sound

As a result of the acoustic simulations of the models belonging to the examined sports hall in the ODEON v10 program, the values of the objective parameters of the sound were obtained. Among these objective parameters, numerical values of Reverberation Time (T30), Early Decay Time (EDT), Definition (D50), Clarity (C80), Early Lateral Fraction (LF80) and Sound Transmission Index (STI) parameters were evaluated within the scope of this study. In the hall: 1. Parameter evaluated during sports activities: T30, 2. Parameters evaluated during musical activities: T30, EDT, C80, LF80 3. Parameters evaluated during speaking activities: T30, EDT, D50, STI, C80. If gyms are used for sports activities: For the optimum value range of the Reverberation Time (T30), the optimum tinnitus times recommended for sports halls in the BB93 standard are taken as a basis. According to the standard, the average T30 values obtained in the 500 Hz, 1000 Hz and 2000 Hz octave bands of sports halls larger than 530 m<sup>2</sup> should be 2 seconds The value range of %10 below and above the T30 value obtained according to the Standard is taken as the optimum range [18]. Accordingly, the optimum value range is  $T30 \ 1.8 < T30 < 2.2$ . The optimum T30 in music activities was obtained through the graph suggested by Knudsen and Harris [19]. The optimum EDT value was considered as %10 higher than the T30 value [18]. The optimum LF80 value was taken as  $> 0.25$ , recommended by Odeon [14]. The optimum C80, on the other hand, was considered within the range of -4 dB to +4 dB [20] (Table 3). For speech activities, the optimum T30 value was obtained from the graph by Knudsen and Harris [19]. For EDT, the optimum value is considered as  $EDT < Tmid$  [21]. Regarding D50, the optimum level is within the range of 0.30 to 0.70 [22]. For C80, the optimum level is within the range of -2 dB to +2 dB [23]. As for STI, the values recommended by Houtgast et al. [24] have been taken into account (Table 4).

**Table 3.** Optimum Value Ranges of Objective Parameters Evaluated for the Use of the Beşirli Tennis Court Sports Facility for Music Activities

Scenarios	T30 [19]	EDT [21]	C80 [20]	LF80 [14]
Current Status	$1,60 < T30 < 1,95$ T30 <sub>(ave.)</sub> : 1,78	$1,75 < EDT < 2,14$ EDT: 1,95	$-4dB < C80 < 4dB$	LF80 $> 0,25$

**Table 4.** Beşirli Tennis Court sports facility's optimum value ranges of parameters evaluated for speech activities:

Scenarios	T30 [19]	EDT [21]	D50 [22]	STI [24]	C80 [23]
Current Status	$0,99 < T30 < 1,21$ T30 <sub>(ave.)</sub> : 1,1	EDT $< 1,1$	$0,3 < D50 < 0,7$	0,00 – 0,30 'bad', 0,30 – 0,45 'weak', 0,45 – 0,60 'moderate', 0,60 – 0,75 'good' 0,75-1,00 'perfect'	$-2 < C80 < +2$

### 3. Findings and Discussion

In this section, the results of the objective parameters T30 (Reverberation Time), EDT (Early Decay Time), D50 (Clarity), C80 (Definition), LF80 (Early Lateral Fraction), and STI (Speech Transmission Index) obtained using the ODEON V10 simulation program were evaluated. The results of the objective acoustic parameters for the current state of the examined sports facility and the adjustments made for the proposed acoustic improvements were compared with each other and with the optimum values.

#### 3.1. Analysis of T30 values

The average T30 values obtained when the spectator area is %50 full for the Central Tennis Court of Beşirli are given in Figure 4. When the audience area is %50 full, T30 values for the current state of the hall increase up to 125 Hz at lower frequencies, while decreasing with frequency increase at frequencies above 125 Hz. For the current state, the average T30 value was obtained as 3.95 seconds in the mid-frequency range designated for sports activities, while it was measured as 4.52 seconds in the mid-frequency range specified for speech and music activities (Figure 4). These values are well above the optimum level ranges accepted for sports, music and speech activities. The average T30 values obtained for the cases where the covers of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface of the sports hall were open at 90° and 45°, closed, and without covers, show an increase from low frequencies to mid-frequencies and a decrease from mid-frequencies to high frequencies. The average T30 values obtained at medium frequencies for sports activities are 1.64 sec when the prismatic mechanism covers are open at 90°, 2.01 sec when the prismatic mechanism covers are open at 45°, and 3.08 sec when the prismatic mechanism covers are closed at 90°. In cases where prismatic mechanisms are capless, the T30 value at medium frequencies is 1.98 sec. The mean T30 values obtained at medium frequencies for speech and music activities are 1.72 sec. when the prismatic mechanism covers are open at 90°, 2.13 sec. when the prismatic mechanism covers are open at 45°, and 3.3 sec. when the prismatic mechanism covers are closed. When prismatic mechanisms are capless, the T30 value obtained at medium frequencies is 2.1 sec. During sports activities in the hall, the average T30 values obtained for the situation where the prismatic mechanism covers are open at 45° and the mechanisms are capless are within the accepted optimum values range. While the average T30 value obtained for the situation where the prismatic mechanism covers are open at 90° during music activities in the hall is in the range of optimum values, the numerical data obtained from all scenarios for speech activities remain well above the optimum value range.

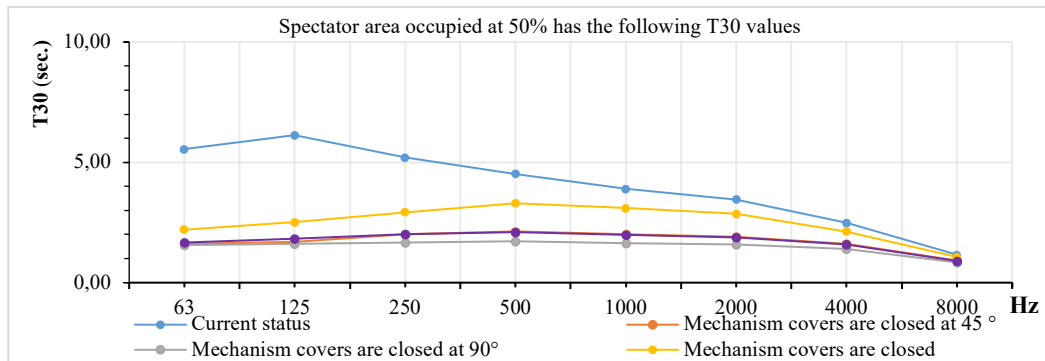


Figure 4. Beşirli Central Tennis Court with the spectator area occupied at %50 has the following T30 values

When the T30 values of the current situation in the sports hall and the situations where prismatic mechanisms are placed on the ceiling surface are compared, it is seen that there is a decrease due to the increase in the sound absorption coefficients of the materials in the new system, especially in the lower and middle frequencies, compared to the current situation.

#### 3.2. Analyses of EDT values

The average EDT values obtained when the audience area is %50 full for the Central Tennis Court of Beşirli are given in Figure 5. When the audience area is %50 full, it is seen that EDT values for the current state of the hall increase up to 125 Hz at lower frequencies, while it decreases with frequency increase at frequencies above 125 Hz. The mean EDT value for the current situation was obtained as 4.35 sec. in the mid-frequency region

determined for speech and music activities (Figure 5). These values are well above the optimum level ranges accepted for music and speech activities. The average EDT values obtained in cases where the covers of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface of the sports hall are 90° and 45° open, the covers are closed and the prismatic mechanisms are without covers increase from lower frequencies to middle frequencies, while decreasing from middle frequencies to higher frequencies. The mean EDT values obtained at medium frequencies for music and speech activities are 1.53 sec. when the prismatic mechanism covers are open at 90°, 2.01 sec. when the prismatic mechanism covers are open at 45°, and 3.21 sec. when the prismatic mechanism covers are closed. In cases where prismatic mechanisms are capless, the EDT value at medium frequencies is 1.82 sec.

In the hall: The average EDT values obtained when the prismatic mechanism covers are open at 45° and the mechanisms are capless during music activities are within the accepted optimum value range. During speech activities, the mean EDT values obtained when the covers of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface are 90° and 45° open, the covers are closed, and the prismatic mechanisms are without a cover are well above the accepted optimum value range. When the EDT values of the current situation in the sports hall and the situations where prismatic mechanisms are placed on the ceiling surface are compared, it is seen that there is a decrease especially in the lower and middle frequencies compared to the current situation.

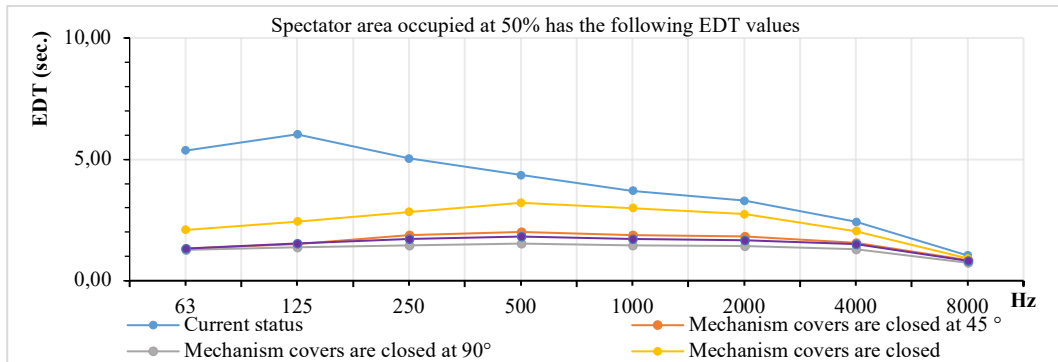


Figure 5. Beşirli Central Tennis Court with the spectator area occupied at %50 has the following EDT values

### 3.3. Analysis of STI values

The threshold values (X50) of the cumulative distribution of the STI values obtained when the audience area is %50 full for the Central Tennis Court of Beşirli are given in Figure 6. The STI value ranges accepted during speaking activities for the sports hall are given in Table 4. When the audience area is 50% full, the STI value obtained for the current condition of the hall is 0.41; this value is at the ‘weak’ level at the specified intervals. While the average STI value of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface of the sports hall was 0.6 when the covers were open at 90°, this value was 0.53 when the covers were closed. The STI value obtained when the prismatic mechanisms are capless is 0.57 (Figure 6).

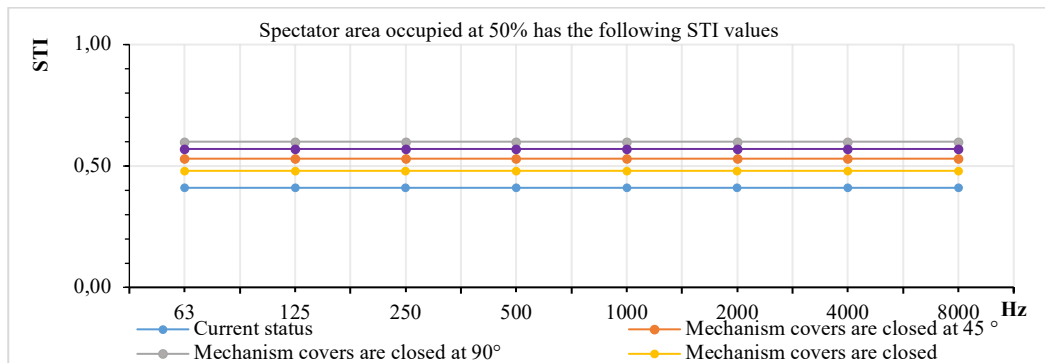


Figure 6. Beşirli Central Tennis Court with the spectator area occupied at %50 has the following STI values

The STI value was found to be ‘moderate’ in cases where the mechanism covers were 90° and 45° open, the covers were closed, and the prismatic mechanisms were capless.

### 3.4. Analysis of D50 Values

The average D50 values obtained when the spectator area is %50 full for the Central Tennis Court of Beşirli are given in Figure 7. The optimum D50 value accepted at medium frequencies during speaking activities for the sports hall was determined as  $0.3 \leq x \leq 0.7$  [22]. When the audience area is %50 full, it is seen that the D50 values obtained for the current state of the tennis court decrease up to 125 Hz at lower frequencies and increase with the frequency increase at frequencies above 125 Hz. The mean D50 value was obtained as 0.29 in the mid-frequency region for the current situation (Figure 7). This value is below the accepted optimum level.

In cases where the covers of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface of the sports hall are 90° and 45° open, the covers are closed and the prismatic mechanisms are capless, the average D50 values obtained decrease from lower frequencies up to 500 Hz but they increase from 500 Hz up to 8000 Hz. At medium frequencies, the mean D50 values are 0.56 when the covers of the prismatic mechanisms are open by 90°, 0.43 when they are open by 45°, and 0.36 when they are closed. In the case of prismatic mechanisms without caps, the D50 value is obtained as 0.50 at medium frequencies.

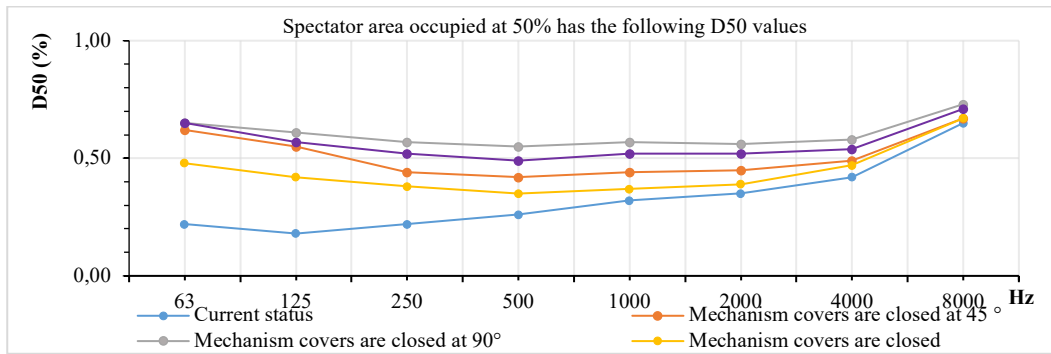


Figure 7. Beşirli Central Tennis Court with the spectator area occupied at %50 has the following D50 values

The average D50 values obtained in cases where the covers of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface of the sports hall are 90° and 45° open, the covers are closed and the prismatic mechanisms are without a cover are within the accepted optimum value range.

### 3.5. Analysis of C80 values

The average C80 values obtained when the spectator area is %50 full for the Beşirli Central Tennis Court are given in Figure 8. When the audience area is %50 full, it is seen that the average C80 value obtained during music and speech activities decreases up to 125 Hz from lower frequencies and increases with frequency increase at frequencies above 125 Hz. The mean C80 value was obtained as -2.21 dB in the mid-frequency region for the current situation (Figure 8). While this value is within the accepted optimum level range for music activities, it is below the accepted optimum level range for speech activities. In cases where the covers of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface of the sports hall are 90° and 45° open, the covers are closed and the prismatic mechanisms are capless, the average C80 values obtained decrease from lower frequencies up to 500 Hz but they increase from 500 Hz up to 8000 Hz. Average C80 values at medium frequencies were obtained as 3.58 dB when the covers of prismatic mechanisms were open at 90°, 1.04 dB when they were open at 45°, and -0.92 dB when they were closed. When the prismatic mechanisms were capless, the C80 value was obtained as 2.3 dB at medium frequencies.



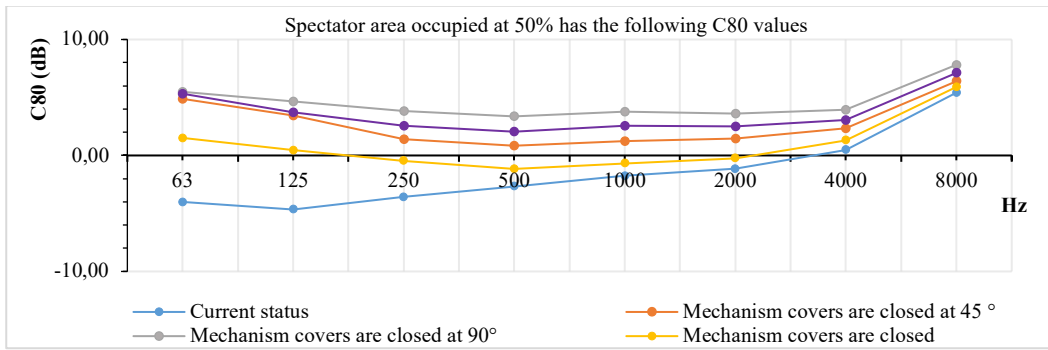


Figure 8. Beşirli Central Tennis Court with the spectator area occupied at %50 has the following C80 values

During musical activities in the hall, the average C80 value obtained for cases where the covers of the prismatic mechanisms are 45° open, 90° open, the covers are closed and the mechanisms are without covers is within the accepted optimum value range. The average C80 value obtained for situations where the covers of the prismatic mechanisms are open by 45° and the covers are closed during speech activities in the hall is within the accepted optimum value range.

### 3.6. Analysis of LF80 values

The average LF80 values obtained when the audience area is %50 full for the Central Tennis Court of Beşirli are given in Figure 9. The average optimum LF80 value at medium frequencies during musical activities for the sports hall was accepted in the range of LF80 >0.25 [14]. When the audience area is %50 full, the average LF80 value obtained at medium frequencies during musical activities decreases from lower frequencies to higher frequencies. The mean LF80 value was obtained as 0.24 in the mid-frequency region for the current situation (Figure 9). This value is below the accepted optimum level. While the average LF80 values obtained in cases where the covers of the prismatic mechanisms placed between the steel structural system on the ceiling surface of the sports hall are 90° open and the covers are closed remain constant up to 125 Hz at lower frequencies, they decrease in the range of 125 Hz- 250 Hz, remain constant in the range of 250 Hz-4000 Hz and tend to decrease towards frequencies above 4000 Hz. The average LF80 values obtained when the covers of prismatic mechanisms are open by 45° remain constant from lower frequencies to 2000Hz, decreasing from 2000Hz to higher frequencies. The average LF80 values obtained when prismatic mechanisms are capless decrease up to 125 Hz at lower frequencies, remain constant in the 125 Hz-2000 Hz range, and tend to decrease with frequency increase at frequencies above 2000 Hz. At medium frequencies, the mean LF80 values were 0.25 when the covers of the prismatic mechanisms were open at 90°, 0.25 when they were open at 45°, and 0.23 when they were closed. In the case where the prismatic mechanisms were capless, the LF80 value was obtained as 0.24 at medium frequencies.

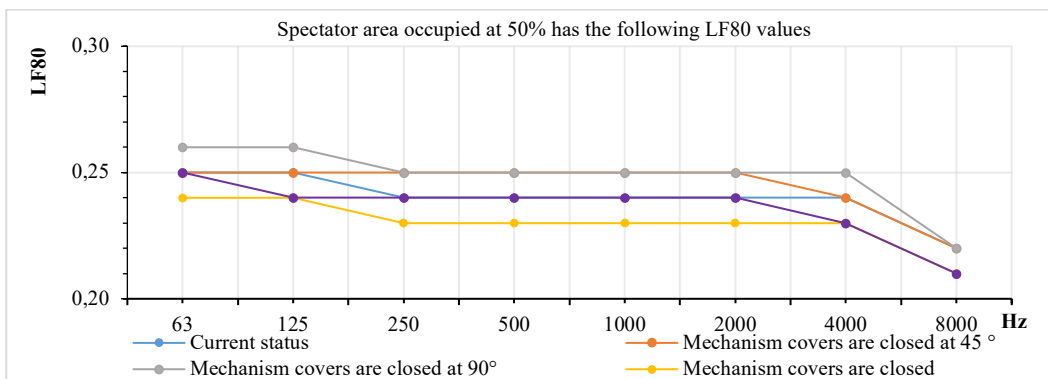


Figure 9. Beşirli Central Tennis Court with the spectator area occupied at %50 has the following LF80 values

The average LF80 value obtained for cases where the covers of the prismatic mechanisms are open by 45° and open by 90° during musical activities in the hall is within the accepted optimum value range.

#### 4. Results

Within the scope of this study, the indoor sports activity area of Beşirli Central Tennis Court, which was built in Trabzon for the European Youth Games, was evaluated acoustically by computer simulation method during sports, music and speech activities. The obtained values were compared with the optimum value ranges. In this context, the current acoustic performance of indoor sports event audience areas in cases where they are %50 full was examined. As a result of the examinations, it was determined that the sports activity area was insufficient according to the optimum acoustic comfort conditions. Then, acoustic solution suggestions were prepared by designing retractable mechanisms that do not affect the field of view of the audience.

The T30 values obtained at medium frequencies for the current conditions of the Beşirli Central Tennis Court activity area are higher than the accepted optimum value. This situation causes the sound in the activity areas to reverberate for a long time, thus reducing the intelligibility of the speech. When the general T30 average for the current situation of the Beşirli Central Tennis Court event area was examined, it remained well above the optimum value ranges determined for music, speech and sports activities. According to the scenarios designed according to the cover movements and audience occupancy rates of the mechanisms placed on the ceiling surface of the tennis court, if sports activities were carried out in the hall, it was obtained in the optimum T30 value range when the mechanism covers were 45° open and the mechanism was uncovered. The T30 values obtained from all designed scenarios remained well above the optimum value range determined when speaking activities were carried out. When the general EDT average for the current situation of the Beşirli Central Tennis Court activity area was examined, it remained well above the optimum value ranges determined for music and speech activities. In case of musical activities in the sports hall, EDT values were not in the optimum range when the mechanism covers were open to 45° and the mechanisms were without covers. The EDT values obtained from all designed scenarios remained well above the determined optimum value range in case of speech activities. When the overall D50 average for the current status of the Beşirli Central Tennis Court activity area was examined, it remained below the optimum value range determined during the speaking activities. When musical activities are performed in the sports hall, D50 values are obtained in the optimum range when the mechanism covers are open at 45°, when the mechanism covers are open at 90°, when the mechanisms are not covered and when the mechanism covers are closed. When the overall STI average for the current status of the Beşirli Central Tennis Court activity area is examined, the mean STI obtained is at the 'moderate' level. When speaking activities were carried out in the sports hall, STI values were obtained at medium levels when the mechanism covers were open at 90°, when the mechanism covers were open at 45°, when the mechanisms were not covered, and when the mechanism covers were closed. When the general C80 average for the current status of the Beşirli Central Tennis Court activity area is examined, the values obtained are above the optimum value range determined during the speaking activities. In case of performing music activities, the situation where the mechanism covers are 90° open, the mechanism covers are 45° open, the mechanisms are capless, and the mechanism covers are closed is within the optimum C80 value range. When the overall LF80 average for the current status of the Beşirli Central Tennis Court activity area was examined, the values obtained remained below the optimum value range determined during music activities. When musical activities were performed in the gym, optimum LF80 values were obtained when the mechanism covers were open at 45° and the mechanism covers were open at 90°.

#### Acknowledgement

This study was produced from the Master's Thesis titled "Acoustic Evaluation of Indoor Sports Halls for Multipurpose Use: The Case of Trabzon". (Author of the M.Sc. thesis: Ayşegül Kandemir)

#### References

- [1] Ulusoy G. Tavukçuoğlu A., ve Çalışkan M., Tip Proje Spor Salonlarındaki Akustik Özelliklerin Çok Amaçlı Kullanımlar İçin İyileştirilmesi. 10. Ulusal Akustik Kongresi, 16 - 17 Aralık 2013, İstanbul, Türkiye.
- [2] Yoo HC. The Room Acoustics of Gymnasium Building. 5th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology, Tomsk, 2001, pp. 35-38.
- [3] BB93, Acoustic Desing Of Schools Performance Standarts, Government Publications,UK, 2015.
- [4] Ellison S, Schwenke R, The Case for Widely Variable Acoustics, Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010, 29-31 August 2010, Melbourne, Australia.
- [5] Tekin O. Spor Salonlarının Çok Amaçlı Kullanımında Akustik Performansın Malzeme ve Tasarım Değişkenleri Aracılığıyla İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.

- [6] Balcı H, Antalya Cam Piramiti'nin Hacim Akustiğinin Bilgisayar Simülasyon Yöntemiyle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
- [7] Şimşek O, Çok Amaçlı Salonlarda Değiştirilebilir Akustik Tasarım: Sinema Anadolu Çok Amaçlı Salonu Örneği, Academic Platform Journal of Engineering and Science, 2021; 9-2; 360-370.
- [8] Kavraz M. The Acoustic Characteristics of the Çarşı Mosque in Trabzon. Turkey, Indoor and Built Environment, 2014; 1-9.
- [9] Aktı B. Daire Planlı ve Kubbe Bitişli Çok Amaçlı Salonlarda Akustik Performansın Tasarım Değişkenleri Aracılığıyla Simülasyon Programında İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- [10] Demirel F. İlisulu S. G. ve Görkem M., "Sivas Kültür Merkezi çok amaçlı salonu akustik tasarımı", Politeknik Dergisi, 2018; 21(3): 535-542.
- [11] <https://www.dailymotion.com/video/x6h64m1>, Erişim Tarihi: 25.10.2023
- [12] <https://web.archive.org/web/20120602214100/http://www.trabzon2011.org/detay/2972/Besirli-Tennis-Courts.html>, Erişim Tarihi: 25.10.2022
- [13] Trabzon Ortahisar Belediyesi Arşivi, 2022.
- [14] Christensen CL. Odeon Room Acoustics Program Version 10.1 Industrial. Auditorium and Combined Editions, Odeon A/S, Denmark, 2009.
- [15] Sü Z, Çalışkan M. Acoustical Design and Noise Control in Metro Stations: Case Studies of The Ankara Metro System. Building Acoustics, 2007; 231-249.
- [16] [https://cds.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9\\_BookBackMatter.pdf](https://cds.cern.ch/record/1251519/files/978-3-540-48830-9_BookBackMatter.pdf), Erişim Tarihi: 11.10.2022
- [17] <http://www.gordon-inc.com/acoustics/ceilings/baffles/>, Erişim Tarihi: 11.06.2022
- [18] Abdülrahimov R. Salonların Akustiği ve Tasarımı, Trabzon, 2005.
- [19] Knudsen VO, Harris CM. Acoustical Designing in Architecture. New York: John Wiley And Sons Inc, 1988.
- [20] Beranek LL. Acoustical Measurements Revised Ed. Acoustical Society of America, USA, 1988; 841 s.
- [21] Mehta, ML, Johnson, J, Rocafort, J. Architectural Acoustics: Principles and Design, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999; 446 s.
- [22] ISO. Acoustics – Measurement of Rooms Acoustic Parameters – Part 1: Performance Spaces. BS EN ISO-3382-1, 2009.
- [23] Sü Z, Çalışkan M, Tavukçuoğlu A. Geçmişten Günümüze Süleymaniye Camii Akustiği, Megaron, 2014; 9(3); 201-216
- [24] Houtgast T, Steeneken HJM, Plomp R. Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics. Acta Acustica, 1980; 46; 60-72.



## Mikro İşlemciler için Sıvı Metal Soğutmalı Mini Kanallı Soğutucularda Kanatçık Kullanımının Termohidrolik Etkilerinin İncelenmesi

Orhan KALKAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye

\*<sup>1</sup>orhan.kalkan@erzincan.edu.tr

(Geliş/Received: 04/08/2023;

Kabul/Accepted: 22/03/2024)

**Öz:** İşlem hızı giderek artan mikro işlemcilerin etkin soğutmaya olan ihtiyaçları da aynı ölçüde artış göstermektedir. Bu ise daha etkili soğutma yöntemleri üzerinde çalışmaları artırmaktadır. Sıvı metaller ile soğutulan mini/mikro kanallı soğutucular, yüksek ısı iletim katsayıları nedeni ile etkin soğutma sağlayabilmektedirler. Bu çalışmada, Galinstan ile soğutulan bir mini kanallı soğutucuda, kanatçık kullanımının ısı direnç katsayısına ve oluşan basınç kaybına etkileri incelenmiştir. Kanatçıkların farklı konfigürasyonlarda kanal içinde yerleşimi ile oluşturulan ve toplamda 70 farklı modelden oluşan sayısal analiz sonucunda; kanatçıklar arası mesafenin 1,5 mm altında olması durumunda kayda değer bir ısı performans iyileşmesi gözlemlenmemekle birlikte aşırı basınç kaybı oluşturduğu belirlenmiştir. Kanatçık boyunun 0,3 mm ve kanatçıklar arası mesafenin 1,5 mm olduğu durumda, kanatçiksiz duruma göre minimum akışkan giriş hızı koşulunda %15,9 oranında ısı performans iyileşmesi elde edilmiştir. Diğer yandan ise bu durumda 95 kPa değerinde basınç kaybı artışı yaşanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Galinstan, sıvı metal, mini kanallı soğutucu, mikro işlemciler.

### Investigation of the Thermohydraulic Effects of Using Fin in Liquid Metal Cooled Mini-channel Heat Sinks for Microprocessors

**Abstract:** The need for effective cooling of microprocessors, whose processing speed is increasing, is also increasing at the same rate. This increases the work on more effective cooling methods. Mini/micro-channel heat sinks cooled with liquid metals can provide effective cooling due to their high heat conductivity. In this study, the impact of using fins on the thermal resistance coefficient and the resulting pressure drop in a mini-channel heat sink cooled with Galinstan is investigated. As a result of the numerical analysis created by the arrangement of the fins in the channel in different configurations and consisting of a total of 70 different models, no significant thermal performance improvement is observed when the distance between the fins is less than 1.5 mm, but it has been determined that excessive pressure drop occurs. When the fin length is 0.3 mm and the distance between the fins is 1.5 mm, a thermal performance improvement of 15.9% was obtained in the minimum fluid inlet velocity condition compared to the case without fins. On the other hand, there was an increase in pressure loss of 95 kPa in this case.

**Key words:** Galinstan, liquid metal, mini-channel heat sink, microprocessors.

#### 1. Giriş

1949'da Werner Jacobi entegre devre kavramını ilk kez ortaya koyduktan sonra, günümüze kadar geçen süreçte bu devrelerdeki mikro işlemcilerin hızla geliştiğini görmekteyiz [1]. Süregelen bu teknolojik gelişme, mikro işlemcilerdeki işlem hızını artırmakla birlikte ısınma problemini de beraberinde getirmektedir. Mikroelektronik cihazların ısı yayma kapasiteleri 106 W/m<sup>2</sup> ve üzerindedir [2]. Mikroişlemcilerin güç tüketimlerinin hızla artması ile konvansiyonel soğutma teknikleri yetersiz kalmaya başlamıştır. Diğer yandan, elektronik cihazların çalışma sıcaklığının 70 °C'nin altında olması tavsiye edilmekte ve bu noktadan sonra 2 °C'yi aşan her sıcaklık artışı için sistem güvenilirliğinin 10% azalacağı bilinmektedir. Buna bağlı olarak, cihazların verimliliği ve hizmet ömrü azalacaktır [3,4]. Bu nedenle işlemci sıcaklığını bu değer altında tutabilmek için etkili bir ısı yönetim sistemine ihtiyaç duyulur. Bu işlem için ise mini/mikro kanallı soğutucular (MKS) etkili bir soğutma sağlamaktadır. MKS'lerin işlemcilerde kullanılmasına yönelik literatürde yapılan çalışmalar şöyle özetlenmiştir:

Feng ve arkadaşları mikro kanallı bir soğutucunun her bir bölmesine yerleştirilen dairesel kesitli kanatçıkların soğutmaya etkisinin araştırmışlardır [5]. Reynolds sayısının 133 ile 530 arasında değiştiği şartlarda yapılan sayısal simülasyonlarda, MKS'nin ısı transfer karakteristikleri incelenmiştir. Kanal içinde, kanal boyunca uzanan bir kanatçık kullanmak yerine çift dairesel kanatçık kullanımının türbülans oluşumunu artırarak daha iyi ısı transferi sağladığı, akış alanını artırdığı ve buna bağlı basınç düşümünü azalttığı gözlemlenmiştir. Kanatların geometrik konfigürasyonları incelenen çalışmanın sonucu olarak, kanat çapı arttıkça ısı transferi iyileşirken basınç düşümünün de arttığı saptanmıştır. Ayrıca kanatlar arası mesafenin sıcaklık homojenliğine etkisinin önemli

\* Corresponding author: [orhan.kalkan@erzincan.edu.tr](mailto:orhan.kalkan@erzincan.edu.tr). ORCID Number: 0000-0002-9664-1819

olduğu vurgulanmış, en homojen sıcaklık dağılımı, 0,55 mm boşluk mesafesinde elde edilmiştir. Zhang ve arkadaşları çalışmalarında, genişliği 1,25 mm, yüksekliği ise 0,5 mm olan ters akışlı mini kanallı soğutucu tasarlamıştır [6]. Kanal duvarında boşluklu yapılar kullanılmış ve bu boşluğun geometrisinin (zikkak, kare-dalgali ve dalgali), yüksekliğinin (0,1–0,9 mm) ve uzunluğunun (2–15 mm) duvar sıcaklığı karakteristiği üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucu olarak, zikkak boşluklara sahip karşı akışlı MKS, diğer boşluklara kıyasla en düşük duvar sıcaklığını ve en iyi duvar sıcaklığı homojenliğini sağladığı görülmüştür. Khoshvaght-Aliabadi ve arkadaşları kare kesitli sinüs dalgası şeklindeki bir kanal geometrisine sahip MKS tasarımının soğutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir [7]. Tasarlanan MKS'ye ait belirli geometrik parametrelerinin, yani dalga boyu (10, 20 ve 40 mm) ve dalga genliğinin (0,5, 1,0 ve 2,0 mm) etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca su-etilen glikol karışımları (kütlece 100:0, 75:25 ve 50:50 oranlarında), soğutma sıvısının etkisini araştırmak için çalışma sıvısı olarak seçilmiştir. Taşınım ısıl direnci; dalga boyu 20 mm, dalga genliği 1,0 mm ve 0,024 kg/s kütleli debideki su akışı şartlarında, düz kanallı MKS'ye göre %113,8 oranında azalmıştır. Mathew ve Hotta yaptıkları çalışmada, doğal taşınım şartları altında yedi adet yüksek ısı üreten işlemcinin performansını artırmak için Parafin mumu bazlı mini kanalları deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [8]. İncelenen işlemcinin,  $0,4 \times 10^7 - 1,0 \times 10^7$  W/m<sup>3</sup> aralığında homojen dağılıma sahip olmayan sabit hacimsel ısı üretimi sağlanmıştır. Parafin mumu kullanılarak işlemcinin maksimum sıcaklığı %37,34–45,79 oranında azaltılmış ve böylece işlemci performansının 2,33–4,63 kat arttığı gözlemlenmiştir. Deneyle desteklemek için sayısal analiz yapılmış ve her iki sonucun da 4–5 °C işlemci sıcaklık değişimi içerisinde birbiriyle iyi bir şekilde örtüştüğü görülmüştür.

Hoang ve arkadaşları, su soğutuculu ticari jet soğutmalı MKS'nin termohidrolik performansını analiz etmişlerdir [9]. Ticari yazılım 6sigmaET kullanılarak üç boyutlu bir sayısal simülasyon gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Sayısal simülasyon 29 °C, 36 °C, 50 °C ve 60 °C giriş sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Soğutucunun hacimsel debisi, 0,7 l/dk ile 3 l/dk arasında değişmektedir. Mikro kanallarda pin kanatları oluşturulması işlemi dikkate alınarak geometri optimizasyonu yapılmıştır. Çalışma sonucunda, basınç düşümünde önemli bir değişiklik olmaksızın pin kanatlı MKS'nin ısıl direncinin, kanatsız MKS'ye göre %29,4 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Jet soğutuculu MKS'lerin, termal performansı iyileştirmede etkin olduğu vurgulanmıştır. Kim ve Mudawar, iki fazlı akışkan ile soğutulan MKS'lerin termal tasarımı ve çalışma limitleri üzerine bir çalışma yürütmüştür [10]. Soğutma sıvısı olarak HFE-7100, R134a ve suyun kullanıldığı çalışmada, farklı geometrik yapılar ve farklı ısı akışı şartlarından oluşan kombinasyonlar için soğutma performans kıyaslamaları yapılmıştır. Mikro kanalların derinleşmesi ile birlikte maksimum ısı akısının arttığı, buna karşın basınç kaybının azaldığı tespit edilmiştir. Zhang ve arkadaşları çalışmalarında, MKS kanalları içerisinde düz ve burulmuş kanatlara sahip konfigürasyonların soğutma performanslarını sayısal olarak incelemişlerdir [11]. Kanatlara ait üst burulma açısı (0°–45°), alt burulma açısı (0°–45°) ve yüksekliğin (0,5–1,0 mm) soğutma etkileri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, mini kanaldaki bükümlü kanatların ısı transferini iyileştirdiğini ancak aynı zamanda düz kanat ile karşılaştırıldığında akış direncini de artırdığını göstermektedir. Alt burulma açısı 45°, üst burulma açısı 0° ve yüksekliği 0,5 mm olan burulmuş kanatlı MKS, incelenen Reynolds sayısı aralığında (239–954) en yüksek soğutma performansını sağlamıştır.

Son yıllarda, düşük erime sıcaklığına sahip sıvı metallerin, soğutma teknolojilerinde kullanılmasına yönelik çalışmalar artmaktadır [12,13]. Sıvı metallerin suya göre oldukça yüksek ısıl iletkenlik katsayılarına sahip olmaları, yüksek ısı akısına sahip uygulamalarda kullanılması açısından en önemli avantajlarından [14]. Daha önce sıvı metal soğutma teknolojilerinin uygulamaları, sıvı metallerin daha yüksek erime noktaları nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarıyla sınırlıydı. Günümüze kadar Galyum sıvı metalinin erime noktasını düşürmek için çeşitli ötektik galyum alaşımları hazırlanmıştır. Bunların iki önemli örneği; İndiyum ile Galyum alaşımı olan EGaln ve Galyum, İndiyum, Kalay alaşımları olan EGalnSn (Galinstan) olup sırasıyla erime noktaları oda sıcaklığında 15 °C ve -19 °C civarındadır [15,16]. Bu soğutma akışkanlarının her ikisi de çeşitli soğutma teknolojilerinde, özellikle mikro elektronikte kullanılmaktadır. Deng ve arkadaşları, mini ve mikro kanallarda Galyum alaşımı ile suyun ısı ve akış performanslarını karşılaştırmak için deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir [17]. Çalışma sonuçları, soğutma akışkanları yüksek hızlarda çalıştırıldığında, sıvı metal ile soğutulan MKS, sudan daha yüksek ısı transfer katsayısı ürettiğini göstermektedir. Luo ve Liu, farklı kanal genişliklerine sahip sıvı metal ile soğutulan MKS'lerin termal performansını deneysel olarak araştırmışlardır [18]. Sonuç olarak ise, ısı transfer katsayısının, soğutucunun kütleli debisindeki artışla birlikte arttığını ve daha küçük kanal genişliğine sahip soğutucunun daha iyi termal performans gösterdiğini vurgulamışlardır. Tawk ve arkadaşları, güç elektroniği cihazlarının sıvı metal ile soğutulmasını, sayısal ve deneysel olarak inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [19]. Çalışmada sıvı metal alaşımı olarak Galn kullanılmış ve su ile soğutmaya göre performans kıyaslaması yapılmıştır. Çalışma sonucunda, sıvı metal ile soğutmanın su ile soğutmaya göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki maksimum sıcaklık farkının %7'den az olduğunu göstermişlerdir. Yang ve arkadaşları çalışmalarında hem su hem de sıvı metal ile soğutulan MKS için bir analiz yapmışlardır [20]. Sonuç olarak sıvı metalin mini kanal ölçeğinde çok daha iyi bir termal ve akış performansı

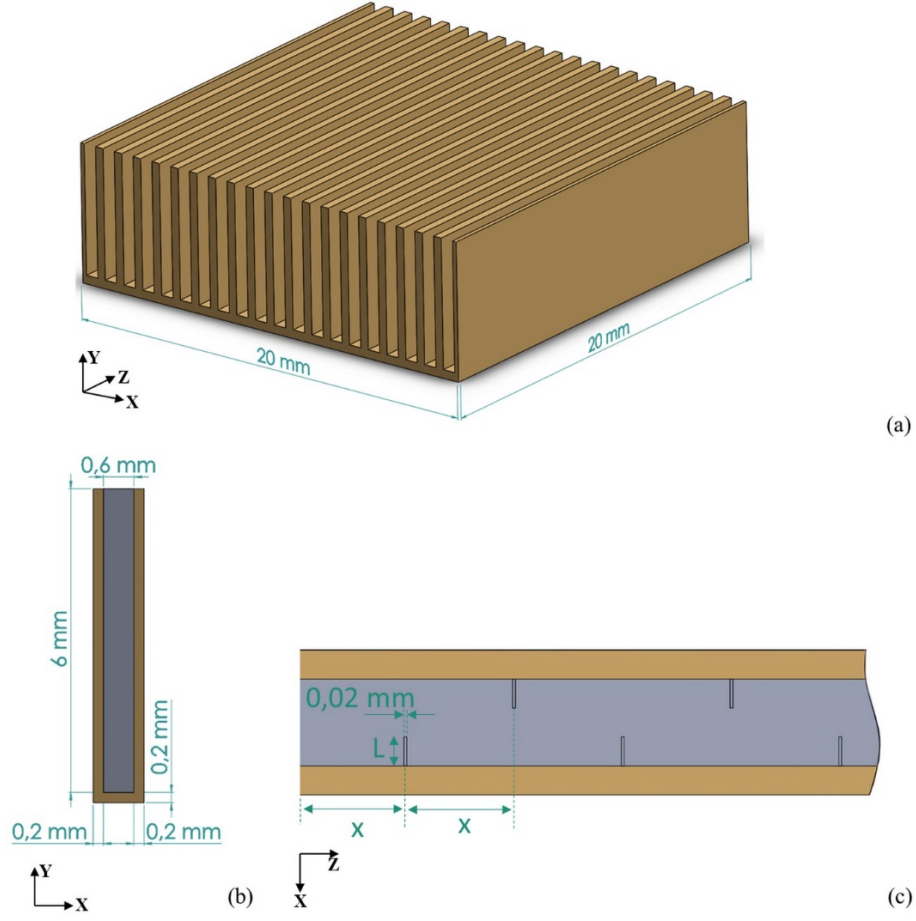
sergilediğini gözlemlemişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlar, farklı korelasyonlarla da karşılaştırılmış ve sıvı metal için bir boyutlu model ile doğrudan sayısal teknik kullanılarak hesaplanan termal dirençlerin, suya göre önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Zhang ve arkadaşları, pompalama gücü ve ısıtma yüklerini değiştirerek Galinstan ile soğutulan bir MKS'nin soğutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir [21]. Çalışma sonucunda, sistemin  $300 \text{ W/cm}^2$  ısı akışı ile  $1500 \text{ W}$  gücündeki ısıtıcıyı istenen seviyede soğutabildiklerini göstermişlerdir. Ayrıca Galinstan ile mini kanallı soğutma için basınç kaybının, su ile mikro kanallı soğutmaya göre çok daha düşük olduğu da kanıtlanmıştır. Muhammed ve arkadaşlarının yaptıkları sayısal çalışmada, farklı alaşımlardan oluşan Galyum bazlı sıvı metal ile soğutan bir MKS üzerinde parametrik incelemeler gerçekleştirmişlerdir [22]. MKS'ye ait kanal genişliği, taban kalınlığı, kanat yüksekliği ve akışkan hızı gibi farklı parametrelerin soğutma performansı ve basınç kaybı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Belirlenen optimum MKS geometrisinin  $0,21 \text{ m/s}$  akışkan hızı ile  $158,3 \text{ W/cm}^2$  değerinde ısı soğurma performansı gösterirken, basınç kaybının ise  $467,7 \text{ Pa}$  olduğu hesaplanmıştır. Sarowar yaptığı sayısal bir çalışmada, beş farklı seramik malzemeden (alüminyum nitrit, berilyum oksit, hafniyum diborür, titanyum diborür ve zirkonyum diborür) yapılan sıvı metal soğutmalı MKS'lerin ısı performanslarını karşılaştırmıştır [23]. Ayrıca EGalSn, EGaln, Galn ve GaSn olmak üzere dört farklı sıvı metal alaşımının ısı ve hidrolik performansları test edilmiştir. Çalışma sonucunda ise alüminyum nitrit malzemeden yapılan MKS en iyi performansı gösterirken, Galn optimum soğutucu akışkan olarak belirtilmiştir. Chen ve arkadaşları, üstten yarıklı, alttan uzatmalı ve kompozit mikro kanal olmak üzere üç yeni tip MKS önermiş ve Galinstanın akış ve ısı transfer özellikleri incelenmiştir [24]. En düşük akış direnci kompozit mikro kanalda elde edilmiştir. Pompalama gücü geleneksel kanal tipine göre %54,9 daha düşük olacağı hesaplanmıştır. Toplam ısı dirençte ise yalnızca %0,7 artış gözlemlenmiştir. Kalkan çalışmasında MKS geometrik parametreleri, MKS malzemesi, Galyum bazlı sıvı metal soğutucu tipi ve soğutucu giriş hızı için optimum bir tasarım sunmuştur [25]. Toplam termal direnç, ilk yatırım maliyeti, basınç düşümü ve maksimum çalışma sıcaklığı performans parametreleri olarak seçilmiştir. Sonuç olarak kanal genişliği, kanal yüksekliği, kanat genişliğinin yarısı, kanat eğim açısı ve giriş hızının belirlenen optimum değerleri sırasıyla  $1,16 \text{ mm}$ ,  $3,00 \text{ mm}$ ,  $0,24 \text{ mm}$ ,  $5,96^\circ$  ve  $0,4 \text{ m/s}$  olarak belirlenmiştir. Ayrıca tasarlanan MKS için alüminyum-bakır hibrit yapısı ve soğutucu için Galn bileşiği optimum seçenek olarak hesaplanmıştır. Xiang ve arkadaşları sıvı metal ile elektronik devre soğutma yöntemini üç farklı mikro jet çarpma sistemine uygulamışlardır [26]. Soğutucu olarak su ve sıvı galyum kullanan bu sistemlerin ısı dirençlerinin karşılaştırılıp analiz edildiği analitik ve sayısal modeller oluşturulmuştur. Sonuçlar, sıvı galyum kullanan sistemlerin suya kıyasla her zaman daha düşük termal dirence sahip olduğunu, termal dirençte maksimum %29,8'lik bir düşüş ve çip sıcaklığında en fazla  $12,6 \text{ K}$  düşüş elde edildiğini göstermiştir. Sıvı metal kullanımı ile minimum termal direncin  $0,033 \text{ K/W}$  değerine kadar düşebileceği vurgulanmıştır.

Literatürde MKS için sıvı metal bazlı soğutma çalışmalarına bakıldığında, sınırlı sayıda çalışma olduğu ve sıvı metal soğutmalı MKS'ler için ısı-hidrolik performans iyileştirme çalışmalarının artırılmasına yönelik gerektiği kadar çalışma yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada, galyum bazlı sıvı metal soğutmalı bir MKS kanalında farklı konfigürasyonlarda kanatçık yapısına sahip tasarımların termohidrolik etkileri, toplamda 70 farklı durum için sayısal analiz yöntemi ile araştırılmıştır. Isı performans parametresi olarak MKS'nin toplam ısı direnci, hidrolik performans parametresi olarak ise kanaldaki basınç kaybı göz önüne alınmıştır. Ayrıca kanaldaki hız dağılımlarının kanatçık yapılarına göre değişimi, simülasyon sonuçlarından elde edilen akım çizgisi konturları oluşturularak irdelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Sayısal Hesaplama Modeli

Mikro işlemcilerin yaklaşık ebatları  $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  olması dolayısıyla, bu taban ölçülerine sahip bir MKS sayısal olarak incelenmek üzere seçilmiştir. Şekil 1a'da üç boyutlu model görünümü verilen MKS'nin sayısal olarak hesaplama alanı ve ölçüleri Şekil 1b'de verilmiştir. Şekil 1c'de ise kanal içerisine farklı ölçülerde yerleştirilen kanatçıkların görünümü verilmiştir. Z ekseni doğrultusunda akışa sahip olan soğutucu akışkan olarak Galinstan sıvı metali seçilmiştir. MKS malzemesi ise bakır olarak tercih edilmiştir. Galinstan ve bakıra ait termofiziksel özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Üç boyutlu eşlenik ısı transfer ve akış çözümlemesi ile analizi gerçekleştirilen bu problem için bazı kabuller ve sınır şartları belirlenmiştir. Akışın sıkıştırılmaz ve sürekli olması, akışkan ve katı çözüm alanlarının fiziksel özelliklerinin sabit olması, radyasyonla ısı transferinin ihmal edilmesi ve enerji denkleminde viskoz difüzyon etkisinin ihmal edilmesi, belirlenen kabullerdir. Sınır şartları olarak ise akışkan giriş hızı ( $v_g$ ), akışkan giriş sıcaklığı ( $T_g$ ), akışkan çıkış basıncı ( $p_c = 0 \text{ Pa}$ ) ve ısı akışı ( $q$ ) belirlenmiştir.  $v_g$  düzgün giriş hızı dağılımına sahip ve  $T_g$  ise  $300 \text{ K}$  olarak kabul edilmiştir. MKS'nin çözüm alanının taban alanına  $100 \text{ W/cm}^2$  değerinde düzgün dağılımlı  $q$  tanımlanmıştır. Ayrıca duvarlarda kaymama koşulu tanımlıdır. ANSYS-Fluent paket programı kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Tüm çözümlerin yakınsama kriteri olarak ise  $10^{-6}$  seçilmiştir.



Şekil 1. MKS'ye ait a) üç boyutlu model görünümü, b) hesaplama alanı ve c) kanatçık geometrisi

Tablo 1. MKS malzemelerine ait termofiziksel özellikler

Malzeme	Özgül ısı (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Yoğunluk, ρ (kg m <sup>-3</sup> )	Isıl iletkenlik, k (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	Dinamik viskozite, μ (Pa s × 10 <sup>-3</sup> )	Prandtl sayısı
Bakır	400	8960	370	-	-
Galinstan	295	6440	16,5	2,4	0,043

Akış alanı için kullanılacak olan temel korunum denklemleri (1) – (3) ile gösterilmiştir.

- Momentum korunum denklemi:

$$\rho_a (\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) \quad (1)$$

- Süreklilik denklemi:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

- Enerjinin korunumu denklemi:

$$\rho_a c_{p,a} (\vec{V} \cdot \nabla T_a) = k_a \nabla^2 T_a \quad (3)$$



Burada,  $\vec{V}$  akışkan hızı,  $T_a$  akışkan sıcaklığı,  $p$  akışkanın basıncıdır.  $\rho_a, c_{p,a}, k_a, \mu$  değerleri ise sırasıyla akışkana ait yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve dinamik viskozite değerleridir.

Kanatçiksiz MKS analizlerinde, maksimum  $v_g$  hızında Reynolds sayısı 2300 kritik değerinden küçük olduğu için lineer akış modeli kullanılmıştır. Kanatçıklı modellerdeki MKS analizlerinde ise RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. k- $\epsilon$  modeli, güçlü hesaplama performansı, hesaplama maliyeti açısından ekonomik olması ve çeşitli çalkantılı koşulların makul derecede doğruluğu nedeniyle en popüler modellerden birisidir [27]. Yakhot ve Orszag tarafından geliştirilen RNG k- $\epsilon$  türbülans modeline ait transport denklemleri (4)-(8) ile şu şekilde verilir [28].

$$\frac{\partial(\rho_a k_a)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a k_a u_i)}{\partial x_i} = P_k - \rho_a \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k_a}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho_a \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_a \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} P_k - C_{2\epsilon}^* \rho_a \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \quad (6)$$

$$\eta = S k_a / \epsilon \quad (7)$$

$$S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2} \quad (8)$$

Burada,  $k$  akışkanın türbülans kinetik enerjisi,  $\epsilon$  türbülanslı kinetik enerjinin dağılma oranı,  $P_k$  ortalama hız gradyanları nedeniyle türbülanslı kinetik enerjisi,  $\mu_t$  türbülans viskozitesidir.  $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, \eta_0$  ve  $\beta$  model sabitleri olup sırasıyla 0,0845, 0,7194, 0,7194, 1,42, 1,68, 4,38 ve 0,012'dir.

MKS ye ait katı çözüm alanı için çözümlenecek tek denklem, enerjinin korunumu denklemi olup (9) ile verilmiştir.

$$k_{MKS} \nabla^2 T_{MKS} = 0 \quad (9)$$

Burada,  $k_{MKS}$  MKS katı malzemesinin yani bakırın ısı iletim katsayısı iken,  $T_{MKS}$  ise MKS sıcaklığıdır. Termohidrolik performansı incelenen MKS için ısıl performans kriteri olarak toplam ısıl direnç ( $R_t$ ), hidrolik performans olarak ise basınç kaybı ( $\Delta P$ ) göz önüne alınmıştır. MKS için  $R_t$  (10) ile hesaplanmaktadır:

$$R_t = \frac{\Delta T_{maks}}{Q} = \frac{T_{maks} - T_g}{Q} \quad (10)$$

$$Q = q A_t \quad (11)$$

Burada,  $T_{maks}$  MKS üzerindeki maksimum sıcaklık,  $Q$  toplam ısı akısı,  $A_t$  ise MKS nin taban alanıdır. Hidrolik performans parametresi olarak belirlenen  $\Delta P$  için, Muhammed ve arkadaşları tarafından sıvı metal soğutmalı MKS'ler için geliştirilen aşağıdaki korelasyon denklemleri kullanılmıştır ve denklem (12) – (14) ile verilir [22].

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{v^2}{2} \quad (12)$$

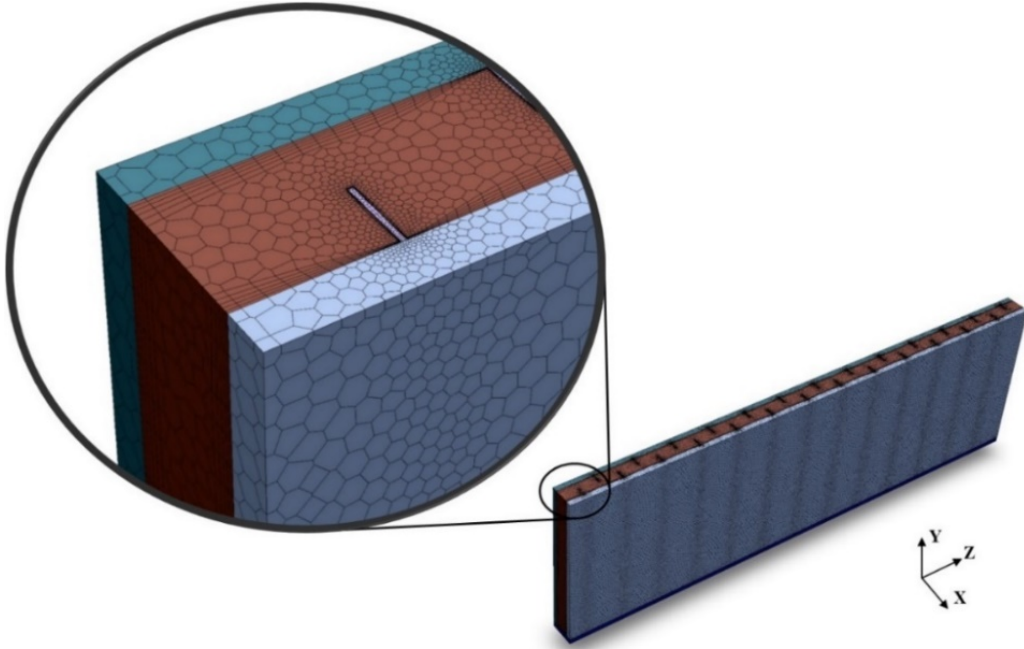
$$f = \frac{21,04 (x_h)^{-0,434} \epsilon^{-0,01}}{Re}, \quad 0,001 < \epsilon < 0,02 \quad (13)$$

$$f = \frac{45,2 (x_h)^{-0,202} \epsilon^{-0,094}}{Re}, \quad 0,001 < \epsilon < 0,02 \quad (14)$$

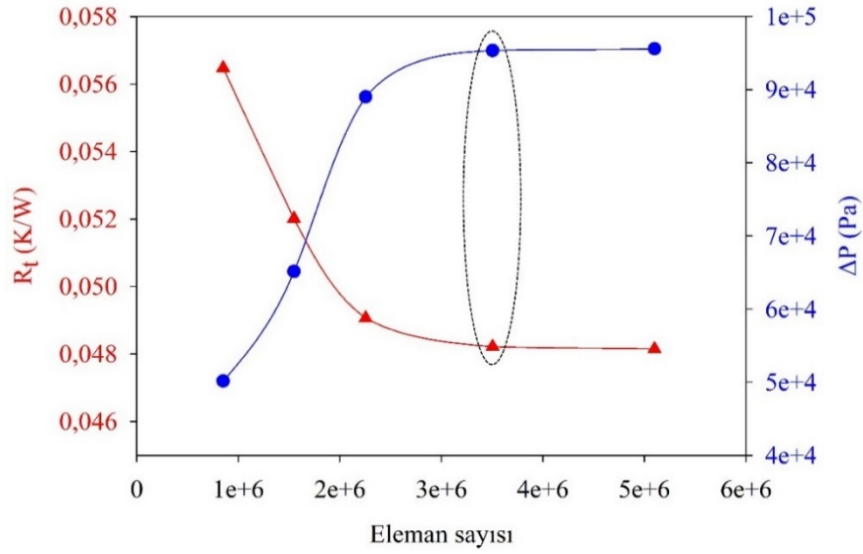
Burada,  $f$  sürtünme katsayısı,  $D_h$  hidrolik çap,  $L$  kanal uzunluğu,  $Re$  Reynolds sayısı,  $x_h$  hidrodinamik giriş uzunluğu,  $\varepsilon$  ise kanalın en-boy oranıdır.

## 2.2. Çözüm Ağının Oluşturulması ve Bağımsızlık Analizi

MKS hesaplama alanı için Şekil 2’ de gösterildiği gibi poligonal yapıda çözüm ağı yapısı, ANSYS çözüm ağı modülü kullanılarak oluşturulmuştur. Ağ yapısında minimum ve maksimum ortogonal kalite değerleri sırasıyla 0,2 ve 0,79’dur. Ayrıca ağ yapısı oluşturulurken doğruya en yakın sonuçları elde etmek ve hesaplama zamanını minimuma indirmek için ağ bağımsızlık analizi yapılması gerekmektedir. Yüksek yoğunluklu ağ yapısına sahip çözüm alanları çözüm süresini artırmakla birlikte yuvarlama ve kesme hatalarının da artışına sebep olmaktadır. Diğer yandan düşük sayıda elemana sahip ağ yapısı kullanımı ise doğru sonuca yakınsamama gibi hatalara sebebiyet verecektir. Dolayısıyla ağ yapısının optimum eleman sayısına sahip olması için, sonuçlardaki değişimin önemsiz kabul edildiği durumdaki eleman sayısına sahip ağ yapısını seçmek gerekecektir. Kanatçıklı yapıdaki MKS için,  $L=0,3$  mm,  $x=1,5$  mm olan model baz alınarak bağımsızlık analizi yapılmıştır. Bağımsızlık analizi parametreleri olarak ise  $R_t$  ve  $\Delta P$  belirlenmiştir. Şekil 3’te eleman sayısına göre  $R_t$  ve  $\Delta P$ ’ nin değişimleri verilmiş olup bu sonuçlarına göre 3504989 eleman sayısına sahip ağ yapısını seçmek uygun olacaktır.



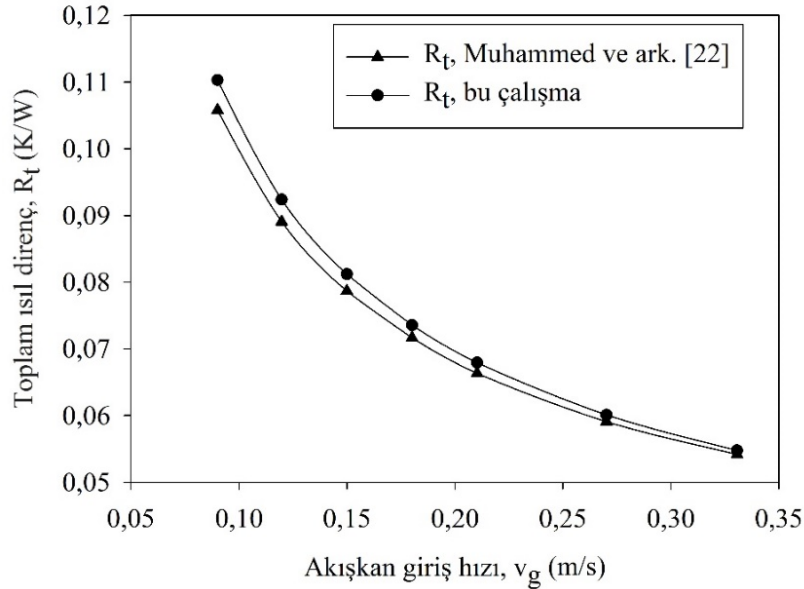
Şekil 2. MKS hesaplama alanına ait ağ yapısı



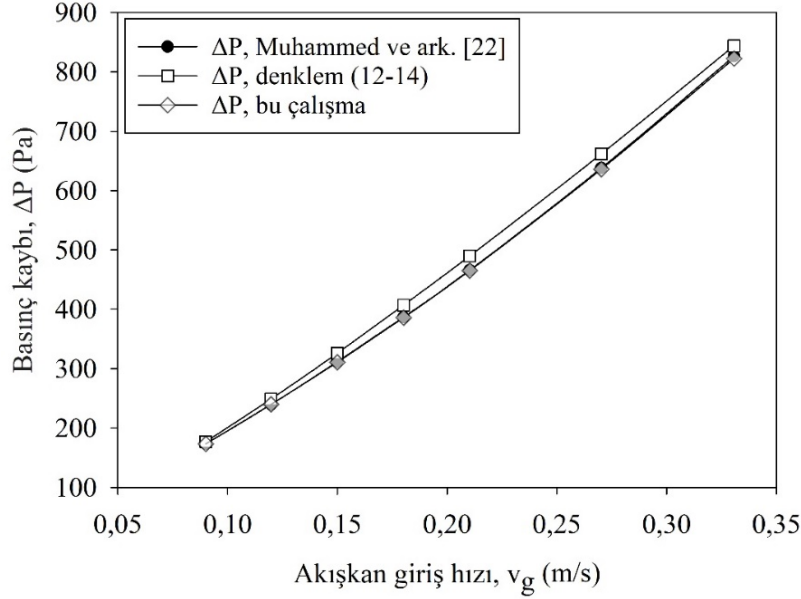
Şekil 3. Ağ yapısı bağımsızlık analizi

## 2.2. Sayısal Analiz Sonuçlarının Doğrulanması

Sıvı metal soğutmalı MKS için yapılan sayısal analizlerin doğruluğunu belirlemek için literatürde yer alan, Muhammed ve arkadaşları tarafından yapılan sayısal bir çalışma ve denklem (12-14)' te verilen korelasyon denklemleri kullanılmıştır [22]. Bu çalışmada kullanılan MKS için kanatsız yapıda elde edilen  $R_t$  ve  $\Delta P$  değerlerinin akışkan giriş hızına ( $v_g$ ) göre değişimleri Şekil 4 ve Şekil 5'te sırasıyla karşılaştırılmıştır.  $R_t$  için maksimum hata oranı akışkan giriş hızı 0,09 m/s iken %4,2 olarak hesaplanmıştır.  $\Delta P$  için ise maksimum hata oranı, akışkan hızı 0,33 m/s iken %5,1 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla bu çalışma için yapılan sayısal analiz sonuçlarının kabul edilebilir seviyede hata oranlarına sahip olduğu söylenebilir.



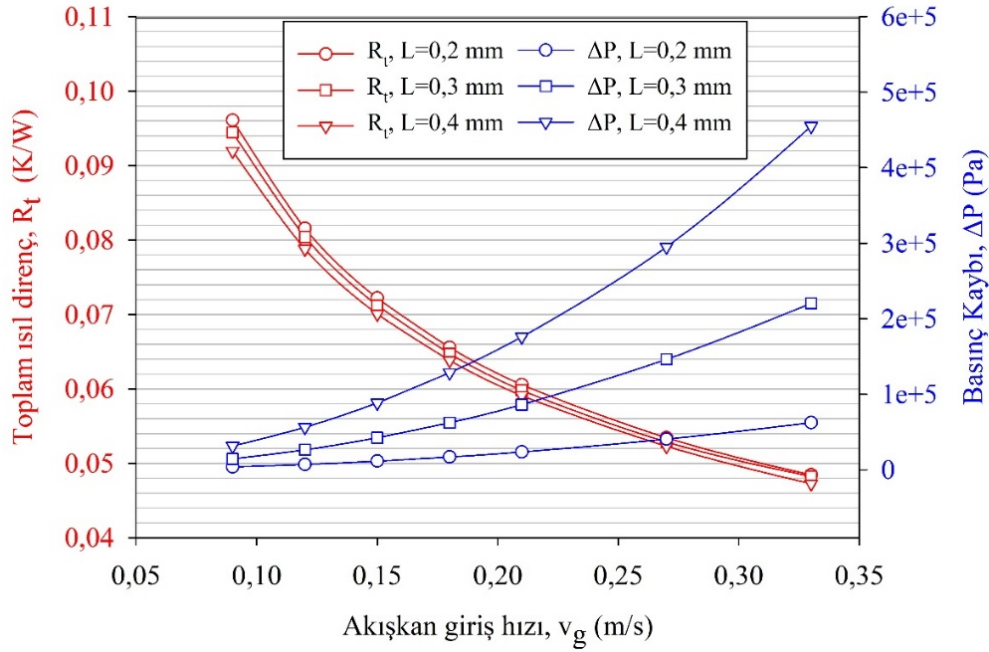
Şekil 4. Toplam ısıl direnç değerinin doğrulanması



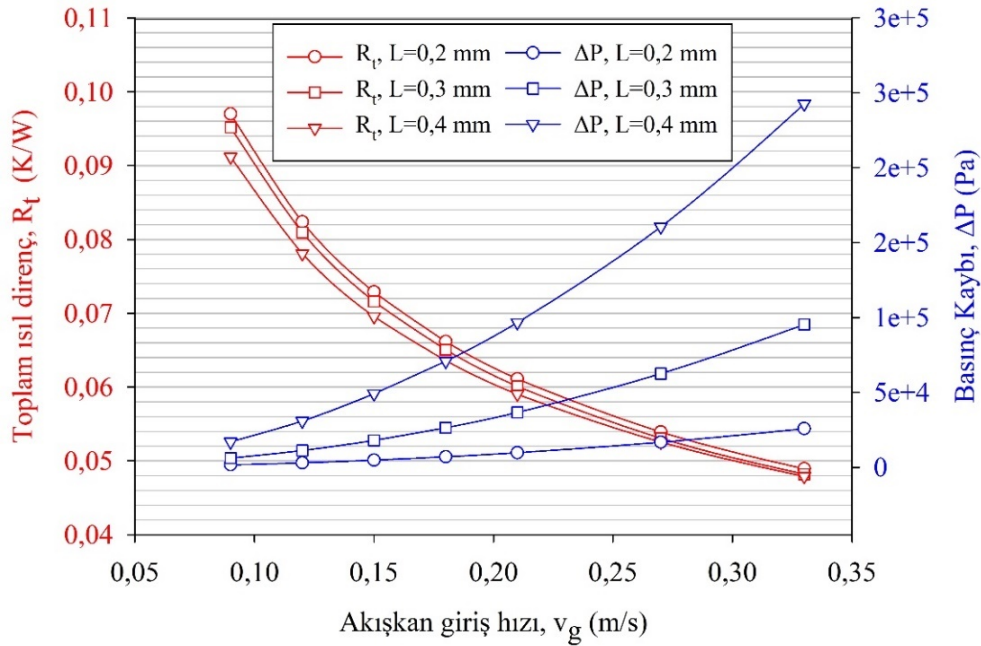
Şekil 5. Basınç kaybı değerinin doğrulanması

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Bu sayısal çalışma kapsamında sıvı metal soğutmalı MKS'ler için kanatçık kullanımının ısı ve hidrolik etkileri incelenmiştir. Kanatçıkların kanalda yerleşimi, üç farklı kanatçık boyu ( $L=0,2, 0,3, 0,4$  mm) ve üç farklı değerinde kanatçıklar arası mesafe ( $x=1, 1,5, 2$  mm) seçilerek belirlenmiştir. Akışkan giriş hızları ise 0,09, 0,12, 0,15, 0,18, 0,21, 0,27, 0,33 m/s olmak üzere 7 farklı değerinde sabit tutularak çözüm yapılmıştır. Böylelikle toplamda kanatçiksız model ile birlikte 70 farklı durum için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da  $x=1$  mm olduğu durum için akışkan giriş hızına bağlı olarak her bir  $L$  değeri için  $R_t$  ve  $\Delta P$  değişim eğrileri gösterilmektedir. Akışkan giriş hızı arttıkça toplam ısı direncin her bir  $L$  boyu için lineer olmayan bir azalma gösterdiği, dolayısıyla daha etkili bir soğutma elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, her  $v_g$  değerinde  $L$  değeri arttıkça toplam ısı direncin düştüğü görülmektedir. Fakat akışkan giriş hızı arttıkça,  $L$  değeri artışının toplam ısı direnci düşürmedeki etkisinin giderek azaldığı söylenebilir. Örneğin  $v_g=0,09$  m/s iken,  $L$  değeri 0,2 mm 'den 0,4 mm ye çıktığında toplam ısı direnci değerinde %4,3 iyileşme gerçekleştirmiştir. Fakat  $v_g=0,33$  m/s iken bu oran %2,5'e düşmüştür. Kanal içerisindeki basınç kaybına bakıldığında hızın artışı ile birlikte her bir  $L$  değeri için parabolik bir artış göstermektedir. Diğer yandan  $L$  nin artışı ile birlikte hıza bağlı basınç kaybı artışının daha fazla olduğu görülmektedir. Minimum akışkan giriş hızı değerinde ( $v_g=0,09$  m/s),  $L=0,2$  mm ve  $L=0,4$  mm olduğu durumlar arasındaki basınç kaybı farkı 27 kPa iken, hız maksimum olduğu şartta ( $v_g=0,33$  m/s) basınç kaybı miktarının 393 kPa değerine çıktığı görülmektedir. Dolayısıyla kanal uzunluğunun yüksek hızlarda basınç kaybını aşırı derecede artırdığı ve buna bağlı pompalama gücünün de çok fazla artacağı söylenebilir.



Şekil 6. x=1 mm durumunda akışkan hızına göre termohidrolik değişim

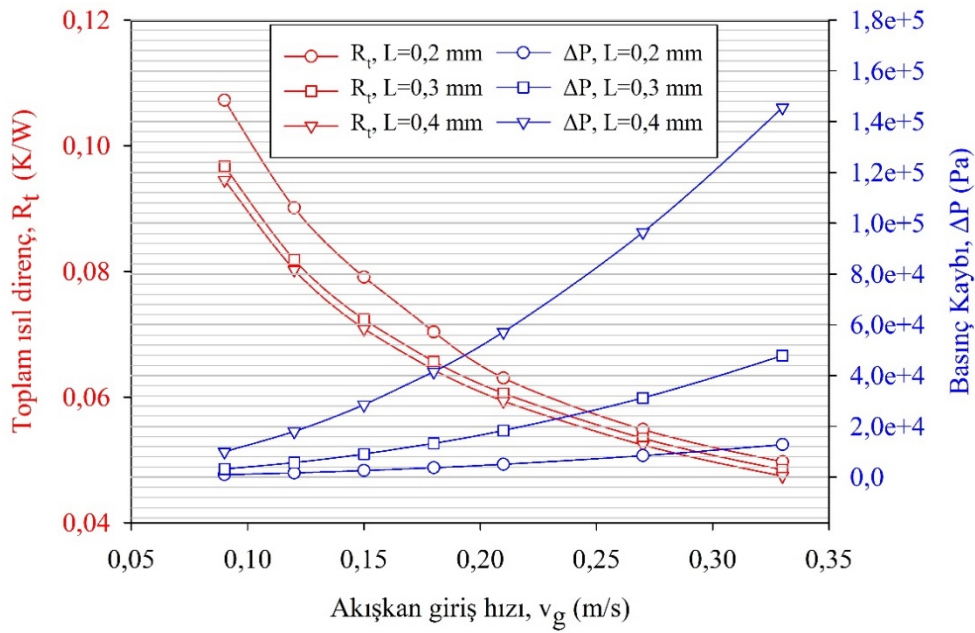


Şekil 7. x=1,5 mm durumunda akışkan hızına göre termohidrolik değişim

Şekil 7' de x=1,5 mm olduğu durum için toplam ısı direnci ve basınç kaybı değerlerinin akışkan giriş hızına bağlı olarak değişim eğrileri verilmiştir. Beklenen bir sonuç olarak  $R_t$ , akışkan giriş hızının artışıyla birlikte düşerken, kanat L uzunluğunun  $R_t$  üzerindeki etkisinin düşük hızlarda daha fazla olduğu görülmektedir. Maksimum hızlara çıktığında kanat L boyunun ısı direnci azaltma etkisi giderek düşmektedir. x=1 mm olan durum ile karşılaştırıldığında ise  $R_t$  tüm hız değerleri göz önüne alındığında, maksimum %1,4 artış göstermiştir. Bu artış ise MKS'de maksimum sıcaklık ( $T_{maks}$ ) değeri olarak yaklaşık 0,3 °C'ye karşılık gelen bir değişimi doğurmaktadır. Dolayısıyla kanatlar arası mesafenin (x) 1,5 mm değerinin altına düşürülmesinin kayda değer bir ısı performans iyileşmesi getirmemesi ile birlikte basınç kaybını da daha fazla artırarak pompalama gücü

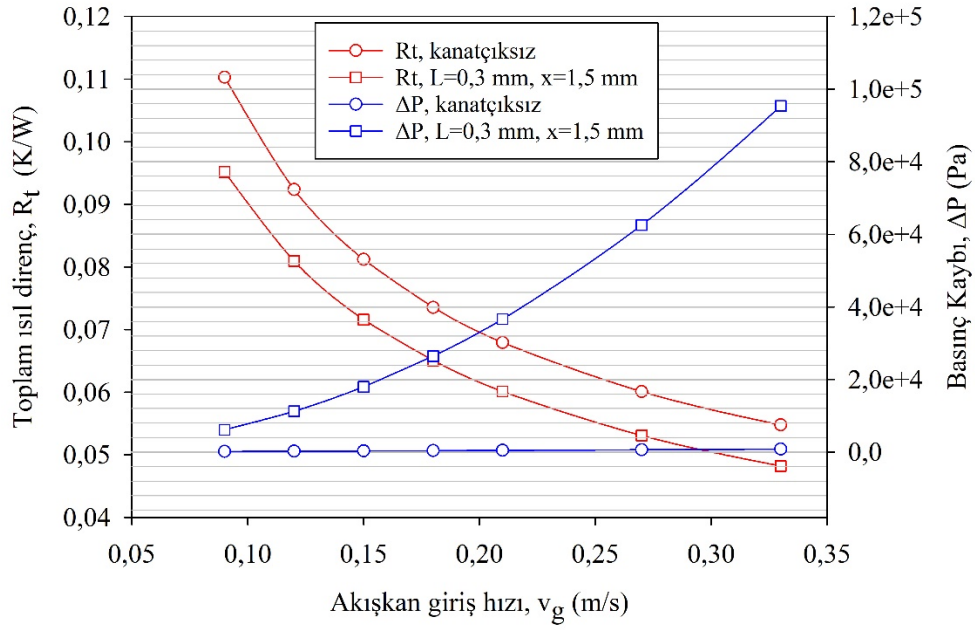
gereksinimini artıracacağı söylenebilir. Diğer yandan  $\Delta P$  değeri  $x=1,5$  mm durumunda da  $v_g$  artışı ile birlikte artmaktadır.  $v_g=0,09$  m/s iken  $L=0,2$  mm ve  $L=0,4$  mm olduğu durumlar arasındaki basınç kaybı farkı 15 kPa iken,  $v_g=0,33$  m/s değerine yükseldiğinde  $\Delta P$  değeri 217 kPa'a çıkmaktadır.

Şekil 8, kanatlar arası  $x$  mesafesinin 2 mm olduğu durumdaki toplam ısı direnç ve basınç kaybı değerlerinin akışkan giriş hızına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Diğer kanatlar arası mesafe durumlarında olduğu gibi giriş hızının artışıyla birlikte  $R_t$  parabolik bir azalış gösterirken  $\Delta P$  değeri ise artmaktadır.  $L$  kanat uzunluğu etkisinin diğer durumlardaki gibi düşük hızlarda daha fazla etkili olduğu görülmekle birlikte,  $x$  mesafesinin artması ile  $R_t$  üzerindeki bu etkinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Örneğin,  $v_g=0,09$  m/s iken,  $L$  değeri 0,2 mm 'den 0,4 mm ye çıktığında toplam ısı direnç değerindeki değişim  $x=1$  mm durumunda %4,3 iken,  $x=2$  mm durumunda bu oran %13,4'e yükselmektedir. Diğer yandan akışkan giriş hızının yükselmesi ile birlikte  $L$  kanat uzunluğu etkisi giderek azalmaktadır. Fakat yüksek  $v_g$  hızlarında  $L$  kanat uzunluğunun basınç kaybına etkisinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Örneğin,  $v_g=0,33$  m/s iken  $L=0,2$  mm ve  $L=0,4$  mm durumlarındaki basınç kaybı farkı 133 kPa'dır.  $v_g=0,09$  m/s iken ise bu fark yaklaşık 9 kPa değerine düşmektedir. Bununla birlikte kanatlar arası mesafenin artması ile birlikte genel olarak basınç kaybının düştüğü de söylenebilir.

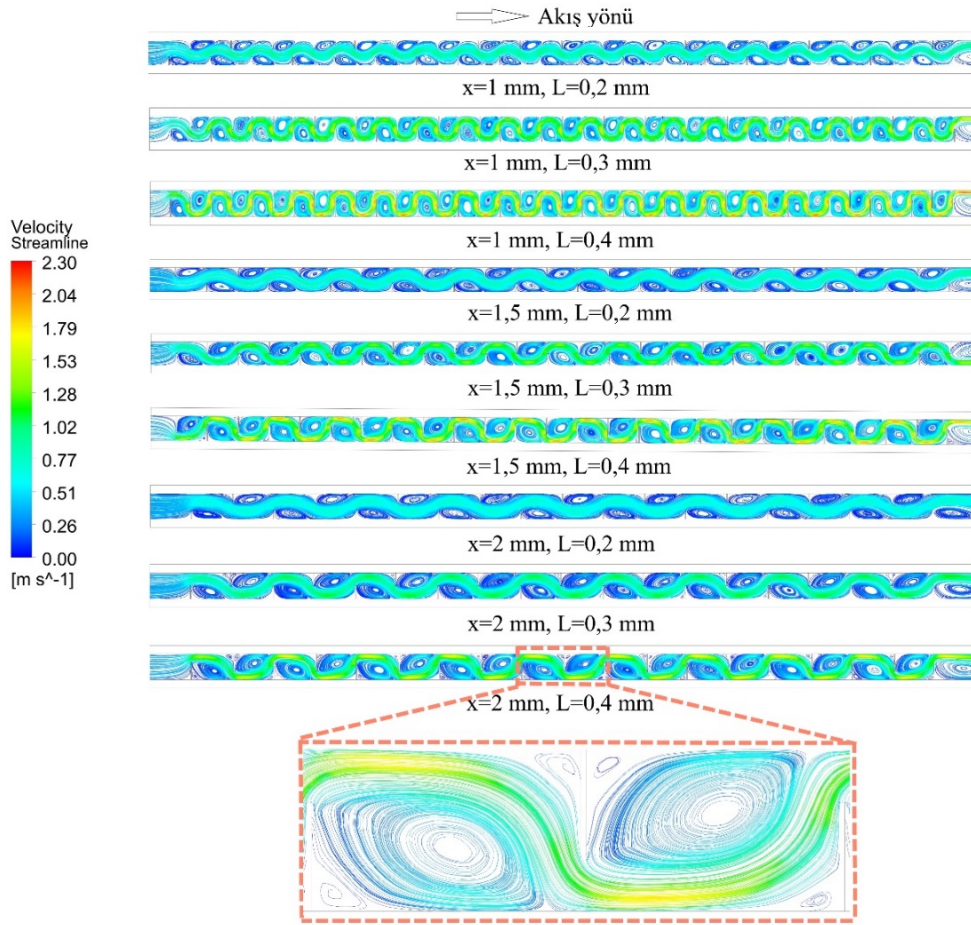


Şekil 8.  $x=2$  mm durumunda akışkan hızına göre termohidrolik değişim

MKS için kanatçık kullanımı ile kanatçiksiz durumun ısı ve hidrolik performans açısından kıyaslanmasının yapıldığı Şekil 9, akışkan giriş hızına göre  $R_t$  ve  $\Delta P$  değerlerinin değişim eğrilerini göstermektedir. Burada, kanatçık  $L$  boyu 0,3 mm ve kanatçıklar arası  $x$  mesafesi 1,5 mm olan durum ile kanatçiksiz MKS karşılaştırılmıştır. Kanatçık kullanımı ile birlikte minimum  $v_g$  hızında ısı performansında %15,9 oranında iyileşme elde edilirken,  $v_g$  hızı maksimum olduğu durumda ise %13,6 oranında  $R_t$  değerinde iyileşme görülmektedir. Kanatçık kullanımı durumunda basınç kaybındaki artışa bakıldığında, akışkan giriş hızının artması ile birlikte ciddi oranda bir fark ortaya çıkmaktadır.  $v_g=0,09$  m/s iken kanatçıklı ve kanatçiksiz durumlardaki basınç kaybı farkı yaklaşık 6 kPa iken,  $v_g$  hızı 0,33 m/s değerine yükseldiğinde bu fark yaklaşık 95 kPa olmaktadır. Dolayısıyla sıvı metal soğutmalı MKS için kanatçık kullanımı ısı performansını iyileştirirken, yüksek akışkan hızlarında oldukça fazla pompalama gücü gereksinimine sebep olacağı söylenebilir.



Şekil 9. Kanatçıklı ve kanatçıksız MKS' nin termohidrolik performans kıyaslaması



Şekil 10. Kanal boyunca akışkan hız dağılımlarını veren akım çizgileri

Yapılan sayısal analiz sonucunda, kanatçık yapılı MKS kanalları içerisinde elde edilen, maksimum akışkan giriş hızı şartındaki ( $v_g=0,33$  m/s) hız dağılımları, her bir L kanat boyu ve kanatlar arası x mesafesi için Şekil 10'da verilmiştir. Her bir durum için ana akım hattındaki akım çizgilerine bakıldığında, kanatlar arası mesafe azaldıkça ve kanat boyu arttıkça akış hızının da arttığı görülmektedir. Diğer yandan kanat boyu minimum iken ( $L=0,2$  mm) hız dağılımı daha homojen olup, kanat boyu maksimum olduğu durumlarda ( $L=0,4$  mm) daha düzensiz bir hız dağılımı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca L kanat boyunun 0,2 mm olduğu durumlarda ana akım hattı dışında kalan ölü bölgelerde düşük hızlı vorteksler görülürken, kanat boyu uzadıkça bu bölgelerde akışkan hızının arttığını gösteren vorteks akım çizgileri görülmektedir. Şekil 10' da,  $x=2$  mm ve  $L=0,4$  mm olan durum için ana akım hattındaki akım çizgilerinin ve ölü bölgede oluşan vortekslerin detaylı görünümü de verilmiştir. Tüm durumlar göz önüne alındığında, yaklaşık 2,3 m/s maksimum hızına, en dar kanatlar arası mesafe ( $x=1$  mm) ve en uzun kanat boyu mesafesi ( $L=0,4$  mm) şartında ulaşılmıştır. Akışkan hızı arttıkça taşınımıyla ısı transferinin arttığı buna karşılık basınç düşümünün de artarak hidrolik performansın azaldığı bilinmektedir. Şekil 8' den de anlaşılacağı üzere maksimum akışkan giriş hızı ( $v_g=0,33$  m/s) ve kanatlar arası mesafe ( $x=2$  mm) şartlarında en düşük ısı direnç katsayısına ( $0,0497$  K/W),  $L=0,4$  mm kanat boyu mesafesinde ulaşılmıştır. Diğer yandan bu şartlarda en yüksek basınç kaybı değeri ( $145559,2$  Pa) elde edilmiştir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada mikroçipler için kullanılan sıvı metal soğutmalı bir mini kanallı soğutucu tasarımında kanatçık kullanımının ısı ve hidrolik performansa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Soğutucu kanalına yerleştirilen kanatçıklar, üç farklı boy uzunluğu ve üç farklı kanatçıklar arası mesafeye sahip olmak üzere toplamda dokuz farklı tasarım elde edilmiştir. Kanatçiksiz soğutucu tasarımı ile birlikte yedi farklı soğutucu akışkan debisi değerinde toplamda 70 sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda mini kanallı soğutucunun toplam ısı direnç değişimleri kıyaslanarak ısı performansı irdelenmiştir. Bununla birlikte kanallardaki basınç kayıpları karşılaştırılmış ve akışkan hızı dağılımları akım çizgileri konturları oluşturularak incelenmiştir. Sonuç olarak, kanatlar arası mesafenin 1,5 mm altında olması durumunda kayda değer bir ısı performans iyileşmesi gözlemlenmemekle birlikte aşırı basınç kaybı oluşturduğu saptanmıştır. Kanat boyunun 0,3 mm ve kanatlar arası mesafenin 1,5 mm olduğu durumda, kanatçiksiz duruma göre minimum akışkan giriş hızı koşulunda %15,9 oranında ısı performans iyileşmesi elde edilmiştir. Diğer yandan ise bu durumda 95 kPa değerinde basınç kaybı artışı yaşanmıştır. İleriki bir çalışma olarak, bu performans parametrelerinin optimizasyonunun yapılması ile daha etkin bir tasarım yapılabileceği söylenebilir.

#### Kaynaklar

- [1] Guarnieri M. The unreasonable accuracy of Moore's Law [Historical]. IEEE Industrial Electronics Magazine 2016; 10(1): 40-43.
- [2] Jing D, He L. Numerical studies on the hydraulic and thermal performances of microchannels with different cross-sectional shapes. Int. J. Heat Mass Tran 2019; 143: 118604.
- [3] Liu D, Zhao FY, Yang HX, Tang GF. Thermoelectric mini cooler coupled with micro thermosiphon for CPU cooling system. Energy 2015; 83: 29-36.
- [4] Dang T, Teng JT. Comparisons of the heat transfer and pressure drop of the microchannel and minichannel heat exchangers. Heat and Mass Transfer 2011; 47: 1311-1322.
- [5] Feng Z, Hu Z, Lan Y, Huang Z, Zhang J. Effects of geometric parameters of circular pin-fins on fluid flow and heat transfer in an interrupted microchannel heat sink. International Journal of Thermal Sciences 2021; 165: 106956.
- [6] Zhang Q, Feng Z, Zhang J, Guo F, Huang S, Li Z. Design of a mini-channel heat sink for high-heat-flux electronic devices. Applied Thermal Engineering 2022; 216: 119053.
- [7] Khoshvaght-Aliabadi M, Sahamiyan M, Hesampour M, Sartipzadeh O. Experimental study on cooling performance of sinusoidal-wavy minichannel heat sink. Applied Thermal Engineering 2016; 92: 50-61.
- [8] Mathew VK, Hotta TK. Performance enhancement of high heat generating IC chips using paraffin wax based minichannels-a combined experimental and numerical approach. International Journal of Thermal Sciences 2021; 164:106865.
- [9] Hoang CH, Tradat M, Manaserh Y, Ramakrisnan B, Rangarajan S, Hadad Y, Schiffres S, Sammakia B. Liquid cooling utilizing a hybrid microchannel/multi-jet heat sink: A component level study of commercial product. International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition, American Society of Mechanical Engineers 2020; Vol. 84041, p. V001T08A008.
- [10] Kim SM, Mudawar I. Thermal design and operational limits of two-phase micro-channel heat sinks. International Journal of Heat and Mass Transfer 2017; 106: 861-876.
- [11] Zhang Q, Feng Z, Li Z, Chen Z, Huang S, Zhang J, Guo F. Numerical investigation on hydraulic and thermal performances of a mini-channel heat sink with twisted ribs. International Journal of Thermal Sciences 2022; 179: 107718.
- [12] Miner A, Ghoshal U. Cooling of high-power-density microdevices using liquid metal coolants. Applied Physics Letters 2004; 85: 506-508.



- [13] Prokhorenko VY, Roshchupkin VV, Pokrasin MA, Prokhorenko SV, Kotov VV. Liquid gallium: potential uses as a heat-transfer agent. *High Temperature* 2000; 38(6): 954-968.
- [14] Al-Neama AF, Kapur N, Summers J, Thompson HM. Thermal management of GaN HEMT devices using serpentine minichannel heat sinks. *Applied Thermal Engineering* 2018; 140: 622-636.
- [15] Bo G, Ren L, Xu X, Du Y, Dou S. Recent progress on liquid metals and their applications. *Advances in Physics: X* 2018; 3(1): 412-441.
- [16] Evans DS, Prince A. Thermal analysis of ga-in-sn system. *Metal Science* 1978; 12(9): 411-414.
- [17] Deng YG, Liu J, Zhou YX. Liquid metal based mini/micro channel cooling device. *International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*; 2009; Pohang, South Korea. 253-259.
- [18] Luo M, Liu J. Experimental investigation of liquid metal alloy based mini-channel heat exchanger for high power electronic devices. *Frontiers in Energy* 2013; 7: 479-486.
- [19] Tawk M, Avenas Y, Kedous-Lebouc A, Petit M. Numerical and experimental investigations of the thermal management of power electronics with liquid metal mini-channel coolers. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2013; 49(3): 1421-1429.
- [20] Yang XH, Tan SC, Ding YJ, Liu J. Flow and thermal modeling and optimization of micro/mini-channel heat sink. *Applied Thermal Engineering* 2017; 117: 289-296.
- [21] Zhang XD, Yang XH, Zhou YX, Rao W, Gao JY, Ding YJ, Shu QQ, Liu J. Experimental investigation of Galinstan based mini-channel cooling for high heat flux and large heat power thermal management. *Energy Convers. Manage.* 2019; 185: 248–258.
- [22] Muhammad A, Selvakumar D, Wu J. Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a liquid metal cooled mini-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2020; 150: 119265.
- [23] Sarowar MT. Numerical analysis of a liquid metal cooled mini channel heat sink with five different ceramic substrates. *Ceramics International* 2021; 47(1): 214-225.
- [24] Chen Z, Qian P, Huang Z, Zhang W, Liu M. Study on flow and heat transfer of liquid metal in the microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences* 2023; 183: 107840.
- [25] Kalkan O. Multi-objective optimization of a liquid metal cooled heat sink for electronic cooling applications. *International Journal of Thermal Sciences* 2023; 190: 108325.
- [26] Xiang X, Liu W, Fan A. Comparison between the cooling performances of micro-jet impingement systems using liquid metal and water as coolants for high power electronics. *International Journal of Thermal Sciences* 2022; 173: 107375.
- [27] Rosettani J, Ahmed W, Geddis P, Wu L, Clements B. Experimental and numerical investigation of gas-liquid metal two-phase flow pumping. *International Journal of Thermofluids* 2021; 10: 100092.
- [28] Yakhot V, Orszag SA. Renormalized group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing* 1986; 1: 3-51.



## Autonomous Vehicle Technology and Technology Acceptance: The Role of Technological Readiness on Consumers' Attitudes Towards Driverless Cars and Intention to Use in the Future

Fatih BİLİCİ<sup>1</sup>, İ. Kürşad TÜRKÖĞLU<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Marketing, Mustafakemalpaşa VS, Bursa Uludağ University, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Amasya University, Amasya, Türkiye

<sup>1</sup> bilici@uludag.edu.tr, \*<sup>2</sup> i.kursad@amasya.edu.tr

(Geliş/Received: 03/11/2023;

Kabul/Accepted: 19/03/2024)

**Abstract:** Autonomous (driverless) cars, which have entered the automotive industry with the developments in automotive and the advancement of artificial intelligence technologies, are rapidly finding a place in the marketing field. At this point, there are factors affecting consumers' concerns and willingness to use autonomous vehicles. In order to discover these factors, the readiness of consumers and the aspects in which they are ready for this technology are issues that need to be investigated. As a result of this situation, consumers' readiness to use autonomous vehicles, their attitudes toward using them, and their intentions to use them in the future are essential. This study aims to reveal the factors affecting consumers' attitudes and intentions towards using autonomous cars. Research data was collected via an online survey method. The convenience sampling method was used in the research. The research model was tested by structural equation modeling using Smart PLS. As a result of the research, it was found that discomfort and distrust dimensions significantly and negatively affected consumers' attitudes towards usage. It was found that the dimensions of optimism, innovativeness, and anthropomorphism significantly and positively affected consumers' attitudes toward use, and users' attitudes towards use significantly and positively affected their intention to use. The research results show that brands that put autonomous cars on the market should give importance to improvements in the dimensions of optimism, innovation, and anthropomorphism and should make improvements that will eliminate consumers' discomfort and insecurity.

**Key words:** Autonomous vehicles, Technology readiness index, Anthropomorphism

### Otonom Araç Teknolojisi ve Teknoloji Kabulü: Tüketicilerin Sürücüsüz Araçlara Yönelik Tutumları ve Gelecekte Kullanım Niyeti Üzerinde Teknolojik Hazırlığın Rolü

**Öz:** Otomotivdeki gelişmeler ve yapay zeka teknolojilerinin ilerlemesiyle otomotiv sektörüne giren otonom (sürücüsüz) arabalar, pazarlama alanında hızla kendine yer bulmaktadır. Pazarda hızla gelişmesine rağmen, tüketicilerin kaygılarını ve otonom araç kullanma isteklerini etkileyen faktörler mevcuttur. Bu faktörlerin keşfedilebilmesi için tüketicilerin bu teknolojiye hazır olup olmadıkları ve hangi yönleriyle bu teknolojiye hazır oldukları araştırılması gereken konulardır. Bu durumun bir sonucu olarak tüketicilerin otonom araç kullanmaya hazır olmaları, kullanıma yönelik tutumları ve gelecekte kullanma niyetleri önem taşımaktadır. Bu çalışma tüketicilerin otonom araç kullanımına yönelik tutum ve niyetlerini etkileyen faktörleri ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Araştırma verileri çevrimiçi anket yöntemiyle toplanmıştır. Araştırmada kolayda örnekleme yöntemi kullanılmıştır. Araştırma modeli Smart PLS kullanılarak yapısal eşitlik modellemesi ile test edilmiştir. Araştırma sonucunda rahatsızlık ve güvensizlik boyutlarının tüketicilerin kullanıma yönelik tutumlarını önemli ölçüde ve olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. İyimserlik, yenilikçilik ve antropomorfizm boyutlarının tüketicilerin kullanıma yönelik tutumlarını anlamlı ve pozitif yönde etkilediği, kullanıcıların kullanıma yönelik tutumlarının ise kullanım niyetlerini anlamlı ve pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir. Araştırma sonuçları, otonom otomobilleri piyasaya süren markaların iyimserlik, yenilikçilik ve antropomorfizm boyutlarında iyileştirmelere önem vermesi ve tüketicilerin rahatsızlık ve güvensizliğini ortadan kaldıracak iyileştirmeler yapması gerektiğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Otonom araçlar, Teknolojiye hazırlık endeksi, İnsanbaçimlilik.

#### 1. Introduction

Our world, with the developing technology, we are entering a new era, the Digital Age. The industrial equivalent of these digital developments appears as the 4th Industrial Revolution. The aim here is to combine existing physical systems with the digital world and ensure that the highest efficiency is achieved at the lowest cost. In addition, targets aimed at reducing negative environmental consequences such as greenhouse gas emissions, decrease in agricultural productivity and climate change are also among the goals of Industry 4.0 [1,2].

One of the most important applications of digitalization, which was considered a dream in the past, is autonomous vehicles [3]. Autonomous vehicles, also called driverless or robot vehicles; They work with the help

\* Sorumlu yazar: [i.kursad@amasya.edu.tr](mailto:i.kursad@amasya.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4803-0463, <sup>2</sup> 0000-0003-4627-4894.

of sensors such as optical and thermographic cameras, radars, lidars, sonars, global positioning system (GPS) and inertial measurement system placed on the vehicle to detect the environment [4]. With the help of these sensors, they process road and environmental data and create a 3D data model of the environment where the vehicle is located. Depending on the model obtained, they determine the vehicle's traffic controls, its reaction to obstacles and other factors on the road, and the appropriate route with the help of complex algorithms and artificial intelligence-based software [5,6].

The Society of Automotive Engineers (SAE) has defined a vehicle's autonomous driving capabilities as six stages [7]. While level 0 is described as a fully driver-controlled vehicle, levels 1 and 2 are systems called driving assistants that support the driver in certain situations (cruise control, lane tracking system, etc.). Level 3 describes when vehicle control switches to autopilot in certain traffic conditions. When supports such as traffic congestion assistant highway driving control take control of the vehicle, the driver can rest in the vehicle. At this level, the driver can regain driving control in any adverse situation. Level 4 is where automatic systems perform driving control without any need for human intervention. At this level, the vehicle performs system control only under certain and predefined conditions; That is, autonomous controls will not work when the driving route or weather conditions change. In such cases, the driver can take control and the vehicle can continue driving according to redefined conditions. At the last level, Level 5, the vehicle operates completely autonomously without human interaction. These vehicles are generally robots used to transport people or goods. Autonomous vehicles, which are widely used today, are still considered level 2. As a result of the joint efforts of some automotive and software companies, level 3 vehicles have also been produced.

With the development of sensing sensors and software technology, autonomous vehicles will increase traffic safety and passenger comfort day by day; It is estimated that this will lead to a decrease in increasing traffic density in cities, fuel consumption that causes CO<sub>x</sub> emissions, and thus air pollution [8,9]. In addition, it is predicted that it will cause a significant decrease in traffic accidents, which are one of the highest causes of injury and death in our country [10].

The realization of all these positive benefits depends on the smooth operation of the mentioned sensors and software-based artificial intelligence applications. For this reason, very comprehensive testing and development processes are carried out to increase the safety and reliability of the systems used in autonomous vehicles [11]. Many academics and industry leaders demand that standards in autonomous vehicles be defined and implemented in a strict and disciplined manner, as in the aviation and space sector. Some concerns among researchers and industry experts cause greater concerns among the end-user public [12,13]. The development of autonomous vehicles often involves a spiral system development process with great emphasis on regular and regressive system testing. This iterative approach allows for continuous improvement and development of the tool's capabilities [14]. It can be stated that this iterative approach and overcoming safety concerns played an important role in the widespread acceptance and perception of autonomous cars by the public. According to the research conducted by Hulse et al. in 2018 [14], it is seen that the perceptions of autonomous cars vary depending on the perspective of different road users. When the literature on perceived risks is analysed Moody et al. (2020) [15] in their study with more than 30,000 participants from 51 different countries to investigate public expectations about autonomous vehicles, they revealed that the public's autonomous vehicle safety perceptions and concerns are in different shapes and levels in different age groups and different income groups. Kyriakidis et al. (2015) [16] conducted a study with the participation of 5000 people from 109 countries on user acceptance, concerns and purchasing desires about partially autonomous, highly autonomous, and fully autonomous vehicles. Depending on the variables they determined such as age, gender, and personality traits, they revealed the users' desire to buy an autonomous vehicle, their concerns about the autonomous vehicle and their financial expectations. Cunningham et al. (2019) [17] published their study with more than 6000 participants in New Zealand to determine the preference for paying for autonomous driving technologies and to determine attitudes and concerns about autonomous vehicles. The aim of the study was to measure the reactions of different sociodemographic participants regarding the benefits of autonomous vehicles, concerns about autonomous vehicles, conditions of use and paying for this technology. Many studies have been carried out and continue to be carried out to examine the concerns, expectations and preferences of the society, passengers and other vehicle drivers who share the same road with autonomous vehicles [18,19]. Factors such as gender, age and risk-taking behavior can affect the perceived risk and acceptance of autonomous vehicles.

In this study, to make a significant contribution to the literature, the direction in which consumers' positive and negative perceptions towards autonomous vehicle technology will evolve will be examined with the research model created using the literature review. Optimism and innovation, which express positive perceptions, and discomfort and insecurity, which express negative perceptions, of the technological readiness index will be used for the technological readiness of consumers. Additionally, it will be investigated whether consumers attach importance to artificial intelligence displaying human-imitating features. As a result of all this research, with the advancement of technologies that have just reached the 3rd level of the 6-level autonomous driving ability mentioned above [7] with technological developments and the transition to the next autonomous driving levels, a prediction is made about the direction in which consumers' attitudes will be shaped and the activity in the sector is presented. Suggestions will be presented to businesses that are willing to enter the Türkiye market and that they may need to direct consumers' intention to use their brands in the future.

### 1.1. History of autonomous vehicles

The first experiments on autonomous vehicles started in the 1920s. The studies carried out at this time were mostly on driverless vehicles that could be controlled by remote control. Technology, which progressed with small steps from this date until the 1980s, gained momentum in the 1980s with the development of automated systems on highways and the related efforts to develop new automation functions based on the vehicle-highway relationship. It has become more widespread after the 80s, when many automotive manufacturers developed autonomous systems at different levels and functions. Nowadays, after the 2000s, autonomy has become much more visible, especially with the development of electric vehicles. In recent years, with the advancement of technology and application areas, more autonomous vehicles have begun to appear on the roads [20,21].

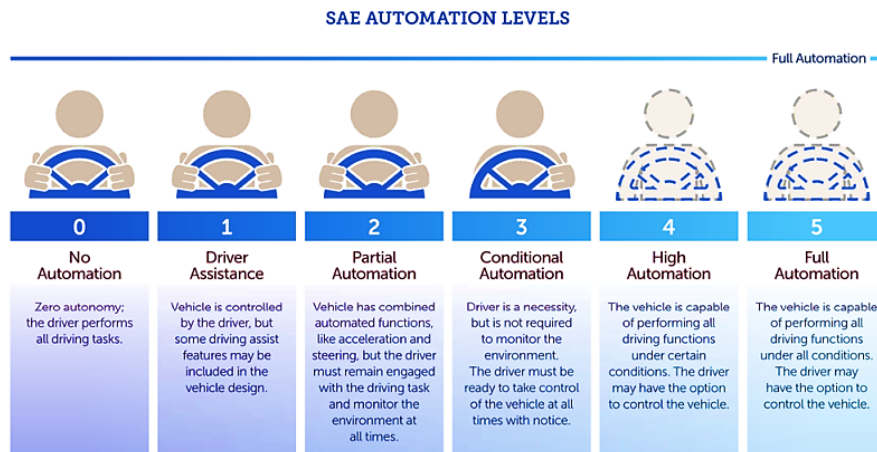
### 1.2. Autonomous vehicle technologies

Autonomous vehicles are vehicles that can perceive their environment and surrounding data and perform various functions by making decisions based on this data they perceive, without any human intervention [22]. These vehicles, which can detect the environment and surrounding conditions while driving through advanced technologies such as sensors, detectors, cameras, global positioning systems (GPS), lidar and radar, guide the vehicle and make the necessary decisions against existing or instantaneous factors in the environment with software-based artificial intelligence. They enable the tasks to be carried out [23].

Intensifying traffic, increasing fatal accidents and traffic safety concerns due to the increasing population, drivers believe that some vital functions in vehicles being performed by software-based computers with a lower margin of error will increase driving comfort and safety. In order to meet these expectations, researchers and manufacturers have begun to work on the production of systems and vehicles that feature different levels of autonomy and have managed to achieve significant results in the field of autonomous driving technologies, especially in the last 20 years.

The Society of Automotive Engineers (SAE) defines autonomous control in vehicles as 6 levels [24].

- Level 0: There is no autonomy at this level, the vehicle is operated manually under the control of the driver.
- Level 1: It is the level where any vehicle feature is automated to assist the driver. The best examples of this level of autonomy are cruise control and speed limiters. Autonomous systems at this level are activated or deactivated by the intervention of the driver.
- Level 2: Like the first level, this is the level where certain features are automated and driving control primarily belongs to the driver. Unlike Level 1, at this level, the automated feature is automatically activated in situations previously defined by the software. But still the driving initiative lies with the driver.
- Level 3: This is the level called conditional automation. The vehicle takes the driving initiative in certain driving conditions. Autonomous systems such as highway driving assistant and traffic jam assistant take control of the vehicle under defined conditions and undertake many driving-related tasks. However, at this level, although the driving control is in the vehicle, the driver must take control of the driving in some situations and negativities.
- Level 4: At this level, called high automation, dynamic driving functions are performed by the system fully automatically, without human intervention, in predefined environments and scenarios. Automation will not work when exiting the specified environment or scenario. In cases where autonomous driving systems are not functional or when requested by the driver, control of the vehicle passes to the driver.
- Level 5: It is the full automation level. At this level, all driving functions of a vehicle are completely autonomous, without human intervention.



**Figure 1.** Automation levels specified in the SAE J3016 standard [24].

Data collected from sensors on driverless or autonomous cars are processed in real time to provide a detailed understanding of the environment. The information collected from the sensors is then analyzed and interpreted by the vehicle's artificial intelligence system. This system uses machine learning and probabilistic reasoning techniques to make decisions and control the vehicle's movements [25]. Artificial intelligence system can recognize and interpret traffic signs, signals, and road signs, as well as predict the behavior of other road users [14]. The decision-making process in autonomous vehicles involves multiple layers of planning. The mission planning layer determines the vehicle's overall goal or destination, while the behavioral layer determines when to change lanes, how to navigate intersections, and performs error correction maneuvers. The movement planning layer selects actions to avoid obstacles while moving towards local targets [26].

Planning layers in autonomous vehicles work together to ensure safe and efficient navigation. Extensive testing and development processes are carried out to ensure the safety and reliability of autonomous cars. The development of autonomous vehicles generally involves a spiral system development process with great emphasis on regular and regressive system testing [26]. This iterative approach allows for continuous improvement and development of the tool's capabilities. It can be stated that this iterative approach and overcoming safety concerns played an important role in the widespread acceptance and perception of autonomous cars by the public. In summary, the working principle of driverless or, in other words, autonomous cars involve the use of sensors, artificial intelligence and advanced algorithms to perceive the environment, make decisions and control the movements of the vehicle. Extensive testing and development processes are carried out to ensure security and reliability. Public perception and acceptance of autonomous cars also play an important role in their adoption.

### 1.3. Technological readiness index

The Technology Readiness Index (TRI), developed as 36-item scale measuring individuals' tendencies to adopt and use the latest technologies, was first published in the Journal of Service Research in 2000 [27,28]. Later, the questions in the scale were developed, their numbers increased and detailed and the TRI2 scale was published in 2015 [29]. TRI basically consists of four main factors: optimism, innovativeness, discomfort, and insecurity [30,31]. It has been researched and found in many studies that these factors affect individuals' attitudes towards technology and their readiness to adopt new technologies. The Technology Readiness Index (TRI), developed as 36-item scale measuring individuals' tendencies to adopt and use the latest technologies, was first published in the Journal of Service Research in 2000 [27,28]. TRI scale It has been researched and found in many different studies. For example, Lam et al. (2008) [32] highlighted that the TRI, as an aggregated measure of the four TR constructs, is positively related to consumers' acceptance of various technology-based products and services. Furthermore, the TRI has been utilized in diverse contexts, such as in predicting and explaining individuals' continuous use of self-service technologies [33], understanding travelers' behavior for sustainable smart tourism [34], and assessing the readiness of users for new technology in different settings [35]. The TRI has also been found to have meaningful relationships with the adoption of cryptocurrency Alharbi & Sohaib (2021) [4] and to affect customer perceived value [36]. This scale, especially technology readiness, is one of the scales that is accepted in the evaluation of new technologies by consumers and on which many studies have been conducted in the literature [37-49].

#### 1.4. Attitude, Intention and Technology Readiness Index

The concept of attitude and intention in the context of consumer behavior and technological readiness is crucial in understanding the factors that influence individuals' acceptance and use of technology. Attitude refers to individuals' overall evaluation or feeling of favorableness or unfavorableness towards using a particular technology. At the same time, intention represents an individual's readiness to perform a given behavior, such as adopting or using a specific technology [50]. In the context of consumer behavior and technological readiness, these concepts play a significant role in shaping individuals' decisions regarding the adoption and use of technology. The Technology Readiness Index (TRI) is a well-established framework that assesses individuals' readiness to embrace and use technology. It comprises four dimensions: optimism, innovativeness, discomfort, and insecurity, collectively influencing individuals' attitudes toward technology [51]. These dimensions are essential in understanding consumers' predispositions towards technology and their willingness to engage with it.

Moreover, the TRI has been integrated into various models, such as the Technology Acceptance Model (TAM), to predict individuals' intentions to adopt and use technology [52]. The relationship between attitude and intention is evident in consumer behavior and technological readiness. Studies have shown that individuals' attitudes toward technology significantly influence their behavioral intentions [53]. For instance, consumers with positive attitudes towards a specific technology are more likely to express intentions to adopt and use it. Additionally, the TRI has been identified as a robust predictor of technology-related behavioral intentions and actual behaviors [54]. This underscores the importance of understanding individuals' attitudes and intentions regarding technological readiness and consumer behavior. Briefly, attitude and intention are integral to understanding consumer behavior and technological readiness. The TRI, with its dimensions of optimism, innovativeness, discomfort, and insecurity, provides a framework for assessing individuals' readiness to embrace technology while influencing their attitudes and intentions toward its adoption and use. Integrating the TRI with other models further enriches our understanding of the complex interrelationships between attitudes, intentions, and technology acceptance.

## 2. Literature Review, Research Model and Hypotheses

Autonomous cars have been the subject of numerous studies on various aspects such as perceptions, safety, decision-making, traffic flow and public acceptance. One study by Hulse et al. (2018) [14] focused on perceptions of autonomous vehicles, particularly in relation to vehicle users, risk, gender, and age. The findings of this study, conducted in the United Kingdom, shed light on acceptance and safety concerns regarding autonomous cars. In another study, Schwarting et al. (2018) [9] draws attention to the planning and decision-making processes involved in autonomous vehicles. This study highlights the need for extensive testing and notes that hundreds of millions of kilometers of testing, which could take several years to complete, may be required to ensure safety. Interactions between autonomous and human-driven vehicles have been examined through game theory modeling study [55]. This research aimed to verify and validate the control systems of autonomous vehicles by considering the dynamics between conventional and autonomous vehicles. The impact of autonomous driving on the public's mental health was investigated in a study [56]. Factors affecting public acceptance of autonomous driving were analyzed and its effects on the psychological well-being of the public were examined. There are many studies focusing on the effects of autonomous vehicles on traffic flow. In one study, Muhammad et al. (2022) [57] included micro-autonomous vehicles in a model called the cellular automaton model to evaluate the effects of autonomous cars on traffic congestion and highway capacity. Another study by Muhammed et al. (2020) [58] simulated the impact of autonomous vehicles, including autonomous buses, on traffic flow characteristics. Studies have been conducted from various perspectives to understand the social acceptance of autonomous vehicles. Tan et al. (2019) [59] investigated choice behavior based on logistics models, considering participants' personal characteristics, travel demand, and cognitive aspects of autonomous vehicles. Another study by Asadi-Shekari et al. (2022) [60] applied machine learning to explore emotions about sharing the road with autonomous vehicles as a cyclist or pedestrian. Azevedo et al. (2016) [61] conducted a study focusing on the microsimulation of the supply and demand of autonomous mobility on demand.

Moreover, when evaluated in the context of artificial intelligence, in recent years there has been an increasing interest in the impact of innovation on attitudes towards the use of technology, autonomous devices and artificial intelligence (AI). Various studies have examined the relationship between these constructs and found that the perceived usefulness, consumers' benefits, and innovativeness of these technologies can promote positive attitudes and increase the willingness to use [62-65]. For example, Wu et al. (2021) [62] found that the perceived usefulness of autonomous driving technology positively affects individuals' attitudes towards autonomous vehicles and their willingness to use them. Similarly, Zhang et al. (2021) [63] extended the Unified Theory of Technology Acceptance and Use model and found that risk expectation and consumer innovativeness are influential factors in the acceptance of autonomous vehicles. The development of autonomous vehicles has been facilitated by advances in artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) technologies [66-68]. The cybersecurity of autonomous vehicles has also been a matter of debate. Additionally, Ma et al. (2020) [68] conducted research on artificial intelligence applications in the development of autonomous vehicles and

highlighted various artificial intelligence techniques used in the perception, decision-making and control systems of autonomous vehicles. The impact of autonomous vehicles and artificial intelligence technologies extends beyond individual attitudes and usage. Acceptance and adoption of autonomous vehicles and artificial intelligence technologies is affected by various factors such as individual determinants, psychological factors and demographic characteristics. Golbabaei et al. (2020) [64] conducted a systematic review of the literature and revealed individual determinants of public acceptance and usage intention of autonomous vehicles, such as exposure to in-vehicle technologies. Huang (2023) [65] investigated the psychological factors affecting users and found that potential users' intentions to use autonomous vehicles and usability and technology acceptance model are important factors. Additionally, Meidute-Kavaliauskiene et al. (2021) [69] conducted a survey study on autonomous vehicles, finding that younger respondents with a tech-savvy background were more likely to have a positive attitude towards autonomous vehicles. Additionally, Erskine et al. [70] applied the unified theory of technology acceptance and use (UTAUT2) to evaluate consumer attitudes and behavioral intentions towards autonomous vehicles. This study highlights the importance of security and technology acceptance in shaping consumer attitudes. Becker and Axhausen (2017) [71] discussed consumers' attitudes towards autonomous vehicles, providing insight into various models and public perceptions [71,72].

When the local literature is examined, Nasır and Özçelik (2017) [73] investigated the perceived benefits, concerns, and users' attitudes about autonomous vehicles by conducting an online survey with 290 people across Turkey. According to the study results, although 89% of the survey participants had heard of driverless vehicles, only 23% stated that they knew about them. While the majority of participants (67%) found driverless vehicles attractive, 13% did not find them attractive. It can be stated that the essential benefits of driverless vehicles are that they can solve the transportation problems of elderly and disabled people, they can spare time for other activities during travel, and they can go to the desired place while drunk or sick. However, the study participants were most concerned about potential threats to their vehicles and system security from hackers. Despite these concerns, it can be stated that consumers' intentions to use driverless vehicles are observed positively.

Also, Yiğit et al. (2020) [74] aimed in their study to determine the limits of driverless vehicle technology in the field of public policy, examine its actors and market size, evaluate its potential to reduce problems such as fatal accidents and traffic-related greenhouse gas emissions in urban areas, and also determine the legal problems and externalities that this technology may cause. With the proliferation of autonomous vehicles, security problems, surveillance, privacy, data security, and cyber-attacks are also on the agenda. The legal situation in accidents involving autonomous vehicles and the moral dimension of artificial intelligence-supported decisions is also discussed. In the study, ethical principles determined by the German Autonomous Driving Ethics Commission were also evaluated, and suggestions for public policies were presented [74]. Moreover Kocagöz et al. (2020) [75] state in their studies that with the digital transformation in transportation, global strategic collaborations are increasingly becoming strong actors in the intelligent transportation ecosystem. In this context, it is stated that Turkey's Automobile Enterprise Group (TOGG) was established in Turkey in 2018 with six partners, and electric vehicles were introduced at the end of 2019. In this study, we tried to reveal consumers' first impressions and evaluations of the vehicles developed by TOGG. In the study, which was conducted using interviews, one of the qualitative research methods, subjects such as the participants' first reactions to the vehicles, the features they emphasized, price estimates/expectations, purchase intentions, and brand recommendations were examined. According to the study results, it is thought that TOGG's local and national emphasis impacts its marketing communication strategy. It is stated that consumers are generally optimistic about TOGG tools, but the results of this study do not represent all consumers, and more comprehensive research is needed. It is stated that autonomous vehicles entered our lives with Tesla brand cars by Elon Musk [76]. Şener (2023) [77] provides a comprehensive literature review on current studies in autonomous shared vehicle management systems, shedding light on the developments and challenges in this field. Additionally, Semiz and Öztürk (2023) [78] emphasize that legal regulations regarding autonomous vehicles in Turkey should be made soon and draw attention to the importance of addressing legal issues in the transition to autonomous driving. Additionally, Ecevit (2023) [79] investigates consumer acceptance of autonomous delivery vehicles using theoretical models such as the Unified Theory of Technology Acceptance and Use (UTAUT) and Technology Acceptance Model (TAM) to understand consumer behavior toward autonomous vehicles. The focus is on developing logical decision-makers and rules bases for the safe navigation of autonomous vehicles. The importance of modeling driver behavior for the safe use of autonomous vehicles is emphasized [80]

Additionally, Özçevik et al. (2023) [81] analyze simulation environments for autonomous vehicle design, providing insight into the various capabilities and differences of existing simulation environments. Additionally, Uçarlı et al. (2022) [82] emphasize the role of multiple GNSS satellite systems in ensuring accurate positioning, emphasizing the importance of precise and reliable positioning of autonomous vehicles, especially in challenging urban environments. Additionally, Akkaya and Özbay (2022) [83] investigate the impact of autonomous vehicles on innovative transportation policies, pointing to a holistic approach to understanding the broader impacts of autonomous vehicles on transportation policies.

These studies show that autonomous cars are examined in various fields such as technology, urban sustainability, public health, traffic, and transportation policies. As autonomous cars become more widespread, more research and legislation need to be made in these areas. The potential impacts of autonomous vehicles and policy preparations in this context have been examined in the literature. As a result, studies on autonomous cars;



It covers a wide range of topics, including perception, safety, decision-making, traffic flow and public acceptance. These studies provide valuable information on various aspects of autonomous vehicles, and ongoing research and development in this field contributes to the literature. This study aims to make a significant contribution to the literature as it is a different study measuring consumers' readiness for technology and using structural equation modeling on autonomous cars. This research is an original study in this respect. In order to measure consumers' readiness for new technologies, the relationship between the research variables is summarized below and the research model was created accordingly.

### **2.1. The effect of innovativeness on attitude towards usage**

Consumer innovativeness refers to consumers' willingness and ability to adopt and use new products or ideas [84]. Various studies have found that consumer innovativeness has a positive effect on attitude. Soo (2020) [85] found that hedonically motivated consumer innovativeness and socially motivated consumer innovativeness have positive effects on attitude and are strengthened by attractiveness, utility, subcultural appeal, and originality. Jansson (2011) [86] emphasized the potential of innovation to change both attitudes and behavior in the context of the adoption of ecological innovation. Kim et al. (2010) [87] revealed how consumer innovativeness and shopping enjoyment influence beliefs, attitudes, and behavioral intentions towards pop-up store retailing. Esfahani and Reynolds (2021) [88] found a weak negative relationship between social innovativeness and attitude, suggesting that socially innovative consumers may indeed respond negatively to new products. Additionally, consumer innovativeness was found to mediate the relationship between other factors and attitude. For example, Kim and Son (2021) [39] found that innovativeness had a positive effect on attitude, and self-responsibility mediated the relationship between ecological knowledge and innovativeness and attitude. Shams et al. (2020) [90] found that consumer-perceived brand innovativeness and consumer-perceived product innovativeness mediate the effect of brand attitude. Albarrán et al. (2021) [91] investigated the perception of artificial intelligence in Spain. Researchers used logistic regression analysis to analyze attitudes towards robots and artificial intelligence and their possible determinants. The research revealed that perception, innovation, place of residence, gender, age, education level and other socioeconomic and technical variables affect attitudes towards artificial intelligence. This study highlights the complex nature of attitudes towards AI and the various factors that may influence them. However, there are also studies that find inconsistent or mixed results regarding the relationship between consumer innovativeness and attitude. For example, Hirunyawipada and Paswan (2006) [89] noted that the effects of consumer innovativeness on adoption intention are somewhat inconsistent. Studies in the literature generally show that innovativeness has a significant and positive effect on attitudes towards usage.

### **2.2. The effect of optimism on attitude towards usage**

Optimism is an important factor influencing attitudes towards technology adoption. Several studies have investigated the impact of optimism on attitude using the Technology Readiness Index (TRI) framework. A study was conducted by Moxley and Czaja (2022) [38] on older adults' decisions regarding the adoption of technology, and it was revealed that the optimism dimension in the technology readiness scale positively affects attitudes towards the adoption of technology. Similarly, Sani et al. (2021) [30] investigated technology readiness attitudes towards using mobile payment systems. In this study, they used the Technology Acceptance Model (TAM) and found that optimism, along with other factors, significantly affects the intention to use mobile payment systems. In the context of cryptocurrency adoption, Sohaib et al. (2020) [92] examined the relationship between technology readiness dimensions (including optimism) and intention to use cryptocurrency. They found that optimism positively affects cryptocurrency acceptance. Pires et al. (2011) [93], in their study investigating the differences between internet banking users and non-users and the antecedents of the technology acceptance model (TAM), found that optimism, along with other factors, played an important role in explaining the differences between technology users and non-users. The technology readiness index (TRI) framework developed by Parasuraman and Colby (2014) [27] includes optimism as one of the dimensions. In addition, a study conducted in the domestic literature found a significant and positive relationship between optimism and interest in Industry 4.0 [94].

Sinha et al. (2019) [95] in their study investigating mobile payments and the privacy factor in India, they revealed that optimism, as a part of individuals' readiness for technology, affects their intention to use mobile payments. In summary, many studies show that optimism, as part of individuals' technology readiness, has a positive impact on attitudes towards technology adoption. This finding is consistent across many different technology-related areas, including mobile payments, cryptocurrency adoption, online banking, and digital learning. Optimism contributes to individuals' readiness to adopt and use technology, leading to the formation of positive attitudes towards the adoption of technology.

### **2.3. The effect of anthropomorphism on attitudes towards use**

Anthropomorphism, the attribution of human-like characteristics to nonhuman entities, has been studied extensively in a variety of contexts, including its impact on attitudes toward autonomous cars. Various studies investigating the relationship between anthropomorphism and attitudes towards autonomous vehicles shed light on factors affecting trust, acceptance, and other attitudes towards these vehicles. Waytz et al. (2014) [96] found in their study that anthropomorphism increased trust in autonomous vehicles. Researchers conducted an experiment in which participants interacted with an autonomous vehicle that exhibited human-like characteristics and one that did not exhibit human-like characteristics. Results show that participants who interacted with the anthropomorphized vehicle reported higher levels of trust compared to those who interacted with the non-anthropomorphized vehicle. This suggests that anthropomorphism may play a role in shaping attitudes towards autonomous cars by increasing trust. Cheng et al. (2022) [97] investigated the effects of anthropomorphism level on drivers' perceived control, confidence and driving performance. Researchers conducted a driving simulation experiment in which participants interacted with robots that resembled humans at different levels. The results show that higher levels of anthropomorphism lead to increased confidence and perceived control, which in turn improves driving performance. This study strengthens the claim that anthropomorphism may have a positive impact on attitudes towards autonomous cars by increasing trust and perceived control.

Tian and Wang (2022) [98] conducted a study on the psychological determinants of users' adoption of autonomous vehicles from the perspectives of anthropomorphism and UTAUT (Unified Theory of Acceptance and Use of Technology). Researchers surveyed participants to assess their perception of anthropomorphism and their intention to adopt autonomous vehicles. The results show that consumers' perceptions of anthropomorphism positively influence their adoption intentions and highlight the role of anthropomorphism in shaping attitudes towards autonomous cars and their adoption. Finally, Niu et al. (2018) [99] found that anthropomorphizing information about autonomous vehicles can increase trust in these vehicles. Researchers conducted an experiment in which participants were exposed to different types of information about autonomous vehicles, including anthropomorphized information. Results show that participants who received information from a humanized vehicle perceived the vehicles as more trustworthy than those who received information from a non-anthropomorphized vehicle. This supports the idea that anthropomorphism may play a role in shaping attitudes towards autonomous cars by increasing trust. Besides trust and adoption intentions, anthropomorphism has been found to influence other attitudes towards autonomous devices. When the research conducted in the domestic literature is examined, Sönmez and Nart (2022) [100] defined the concept of Anthropomorphism in their study as attributing human characteristics to non-human entities. This study examined the conceptualization process of Anthropomorphism, its prevalence, explanation theories, and empirical research findings in the context of consumer behavior. Research findings show that companies' anthropomorphization of their products and brands produces positive consumer results. However, it has also been emphasized that anthropomorphic products and brands may sometimes lead to negative consequences. As a result of the study, it was stated that Anthropomorphism generally offers positive results for companies but has conditional effects on consumers, and the findings in the literature should be handled with caution unless replication studies support them. However, in the study by Kamran (2021) [101], no effect of the anthropomorphism dimension on attitude was found. Overall, studies in the literature provide evidence that anthropomorphism can have a significant impact on attitudes towards autonomous cars. Anthropomorphizing autonomous vehicles by giving them human-like characteristics can increase trust, perceived control, and adoption intentions. The results in the literature show that anthropomorphism has a significant and positive effect on attitudes towards using.

### **2.4. The effect of discomfort on attitudes towards use**

Discomfort is an important factor to consider when investigating the impact on attitude regarding the Technology Readiness Index (TRI). Several studies have examined the relationship between discomfort and attitudes toward technology adoption. The study by Parasuraman and Colby (2014) [27] did not specifically focus on the impact of discomfort on attitude, but it provides a basis for understanding the role of discomfort in technology readiness. Kuo et al., (2013) [102] conducted a study on the acceptance of mobile electronic medical record systems among nurses. The study examined the effect of nurses' readiness for technology on their acceptance of these systems. Findings revealed that discomfort is one of the factors hindering technology readiness. This result suggests that discomfort may hinder the acceptance and adoption of new technologies, which in turn may affect attitudes towards technology.

Shin and Lee (2014) [103] investigated the effects of technology readiness and technology acceptance on NFC (near field communication) mobile payment services in Korea. Research has found that discomfort and insecurity are two inhibitors of technology readiness. These blockers have been found to have a negative impact on attitudes towards NFC mobile payment services. This also supports the idea that discomfort can influence attitudes towards technology adoption. In summary, numerous studies have shown that discomfort is an important factor that can influence attitudes towards technology adoption. When the studies in the domestic literature were examined, the study conducted by Yaykın and Tolay (2023) [104] investigated the relationship between technological readiness and employee performance. A survey conducted on 201 automotive industry workers

determined that technological readiness has two dimensions: "optimistic-innovative" and "uncomfortable-insecure." According to the research results, it was found that the optimistic-innovative dimension increased the perceived employee performance (78%), while the uncomfortable-insecure dimension decreased it (12%). Additionally, it has been determined that the technology readiness level of white-collar employees is lower than that of blue-collar employees. In another study, discomfort, and insecurity, the negative dimensions of technology readiness, do not significantly affect perceived ease of use and usefulness. Finally, in a study investigating the relationship between personality traits and technology readiness, it was found that there was no significant relationship between discomfort and personality traits. These studies suggest that discomfort may act as a deterrent to technology readiness and negatively impact consumers' intentions to adopt new technologies. Studies in the literature generally show that discomfort has a significant and negative effect on attitudes towards use.

### **2.5. The effect of insecurity on attitude towards use**

Kuo et al. (2013) [102] found that optimism and innovativeness facilitate technology readiness, while discomfort and insecurity play a hindering role. Similarly, Lima et al. (2018) [105] supported the TRI paradigm by stating that discomfort and insecurity of a technology have a negative relationship with technology adoption. Additionally, Sohaib et al. (2020) [92] examined the relationship between technology readiness dimensions (including insecurity) and intention to use cryptocurrency. It was found that the discomfort and insecurity dimensions of the technology readiness scale had significant and negative relationships with cryptocurrency adoption. Roy et al. (2018) [106] found that technology readiness does not directly affect customer attitude, but indirectly through perceived innovation features. This means that although insecurity does not directly affect attitude, it can influence individuals' perception of innovation, which in turn can influence their attitudes towards technology. Additionally, the study by Chen and Lin (2018) [107] was conducted by integrating the Technology Readiness Index (TRI) into the Technology Acceptance Model (TAM) to explain people's acceptance of new technologies. The study argues that TRI explains technology acceptance through the general tendencies of individuals, while TAM focuses on system-specific perceptions. This suggests that insecurity, as a dimension of technology readiness, may play a role in individuals' acceptance of new technologies. Contrary to this result, Şekkeli (2022) [108] found a positive effect of distrust in digital technologies on the perceived usefulness of digital transformation. In summary, studies on the impact of insecurity on attitude in the context of TRI suggest that insecurity acts as an inhibitor of technology readiness and may have a negative relationship with technology adoption and acceptance. However, its effect on attitude may be indirect, mediated by factors such as perceived innovation characteristics.

### **2.6. The effect of attitude towards use on intention to use**

When examined in the context of artificial intelligence-based technologies, Behavioral Reasoning Theory (BRT) is used to examine the effect of attitude on intention [109-112]. For example, Anayat et al. (2023) [109] investigated context-specific reasons and consumer adoption of AI-based voice assistants using the Reasoning Theory approach and revealed that attitude plays an important role in the intention to use AI-based voice assistants. Similarly, Wagner et al. (2023) [110] conducted a configuration analysis to understand potential doctors' intentions to use AI in their future medical practices and revealed that a strong belief in the role of AI is required for the intention to use AI. Teo et al. (2016) [112] developed the expanded Theory of Planned Behavior and found that attitude towards computer use has a significant positive effect on technology use intention. Chin et al. (2022) [113] investigated how the participation of sports facility users could be increased. In this study, they found a positive relationship between the intention to use artificial intelligence fitness services based on the Technology Acceptance Model and attitudes towards artificial intelligence services and purchase intention. Ho et al. (2022) [114], in their study examining the intention to adopt artificial intelligence-supported online environments, found that attitude has a significant effect on behavioral intention in the services offered by tourism and accommodation companies. It has also been found that attitude affects the intention to use in various areas. Liang et al. (2019) [115] examined the application of artificial intelligence in fashion and found that consumers' attitudes towards artificial intelligence positively affected their purchasing intentions towards artificial intelligence products. Li et al. (2016) [116], in their study investigating teacher candidates' intentions to adopt technology, found that attitude towards technology, technology self-efficacy and perceived ease of use significantly predicted their intention to adopt technology. Cosmo et al., (2021) [117] found that attitude towards mobile advertising does not have a direct effect on behavioral intention to use chatbots (chat robot software), but attitude towards chatbots mediates intention to use. In summary, numerous studies show that attitude plays an important role in intention to use. These findings highlight the importance of considering attitude when examining the adoption and acceptance of AI and similar technologies in various fields.

Some studies in the literature were conducted by evaluating technological readiness [14,38,69,91] as well as consumers' gender and age variables. Based on the literature review, the research model and research hypotheses were detailed and created as shown in Figure 2 below.

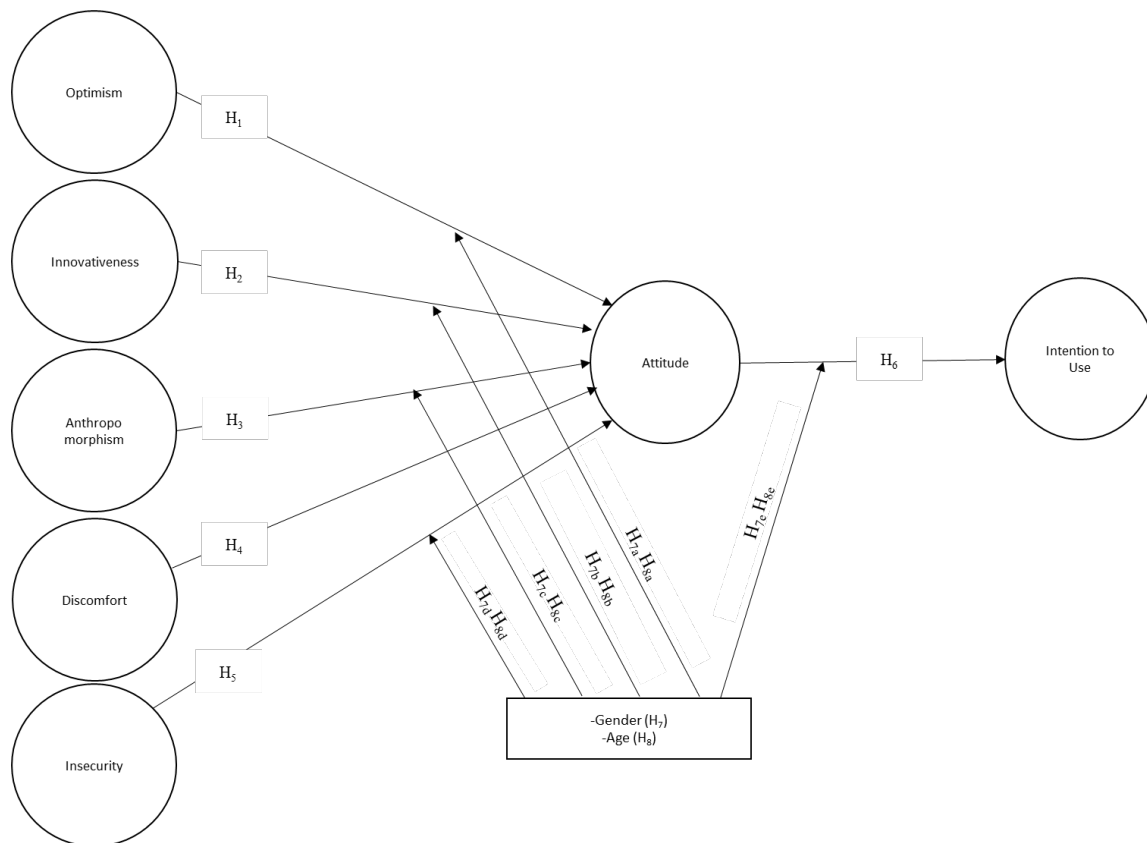


Figure 1. Research Model

**H1:** Optimism towards autonomous cars has a significant and positive effect on consumers' attitudes towards using them.

**H2:** Innovation towards autonomous cars has a significant and positive impact on consumers' attitudes towards using them.

**H3:** Anthropomorphism towards autonomous cars has a significant and positive impact on consumers' attitudes towards using them.

**H4:** Discomfort towards autonomous cars has a significant and negative impact on consumers' attitudes towards using them.

**H5:** Insecurity towards autonomous cars has a significant and negative impact on consumers' attitudes towards using them.

**H6:** The attitude dimension towards use has a significant and positive effect on consumers' intentions to use smart robot vacuum cleaners in the future.

**H7a:** The effect of optimism on attitudes towards using varies by gender.

**H7b:** The effect of innovativeness on attitude towards use varies by gender.

**H7c:** The effect of anthropomorphism on attitudes towards using varies by gender.

**H7d:** The effect of discomfort on attitudes towards use varies by gender.

**H7e:** The effect of insecurity on attitudes towards use varies by gender.

**H7f:** The effect of attitude towards uses on intention to use varies according to gender.

**H8a:** The effect of optimism on attitude towards use varies according to age.

**H8b:** The effect of innovativeness on attitude towards use varies according to age.

**H8c:** The effect of anthropomorphism on attitudes towards using varies according to age.

**H8d:** The effect of discomfort on attitudes towards use varies according to age.

**H8e:** The effect of insecurity on attitudes towards use varies according to age.

**H8f:** The effect of attitude towards uses on intention to use varies according to age.

### 3. Research Methodology

The aim of the research is to reveal the effect of consumers' technological readiness index dimensions (optimism, innovativeness, discomfort, insecurity) and anthropomorphism perceptions towards autonomous cars on their attitude towards using, and the effect of the attitude towards using dimension on their intention to use in the future. In this regard, it will be revealed how consumers' readiness for technology and their perception of anthropomorphism affect their attitude towards using it and their intention to use it in the future, and whether there are differences in the proposed research model according to gender and age variables. For this purpose,

research hypotheses were determined by examining the literature and a research model was created according to the literature. As a result of the literature review, it is noticeable that this issue regarding autonomous cars has not been addressed in a holistic manner. Therefore, it can be stated that this study aims to make an original contribution in theoretical and practical terms.

The data collected in the research of this study was collected based on voluntary participation on consumers living in Turkey and aged 18 and over. No narrowing was made in the research other than these restrictions. Convenience sampling was used in the research. Convenience sampling is a widely used technique in research [118]. It involves selecting participants based on their convenience and accessibility rather than using a random or systematic sampling method. Convenience sampling is frequently used when researchers need to collect data quickly or when it is difficult to reach a representative sample [119]. The survey was kept open on Google forms between September 1 and September 15, 2023, for participants to answer, and the survey forms were collected during this two-week period.

The tenfold rule in the PLS path model refers to the rule that the sample size should be at least ten times the maximum number of internal or external model connections indicating any latent variable in the model. It is based on the assumption that a larger sample size is needed to ensure statistical power and stability in estimating parameters in SEM analysis [120]. However, it is important to remember that the adequacy of the sample size in SEM analysis may vary depending on the specific research context and the complexity of the model being tested [121]. Sample sizes below 100 are considered small, sample sizes between 100 and 200 are considered medium, and sample sizes above 200 are considered large [122]. In the model of this research, the maximum number of internal or external model connections pointing to any latent variable at the initial stage of the analysis is 12. Based on the tenfold rule, a sample containing  $12 \times 10 = 120$  surveys meets the sample size to estimate the PLS path model. It can be stated that the sample number of this study, 141 participants, more than met this rule.

There are two separate sections in the survey form of the research. The first section includes questions to determine the demographic characteristics of the participants. In the second part, there are scale questions to measure the impact of the survey participants' technological readiness and anthropomorphism perceptions towards autonomous cars on their attitudes towards using and intention to use in the future. The scale questions are from the technological readiness 2 (TRI2) scale, which was developed by Parasuraman and Colby (2015) [29] and includes the dimensions of optimism, innovativeness, discomfort, and insecurity. The questions related to the anthropomorphism dimension were taken by Gursoy et al. (2019) [123] study, the questions regarding the attitude towards use dimension were taken from Rese et al. (2014) [124] and Taylor and Todd (1995) [125] studies, and questions regarding future use intention were adapted from Rese et al. (2014) [124] study. Ethics Committee Approval was received for the survey form used in the research from Bursa Uludağ University Research and Publication Ethics Committee on 25 August 2023 (decision number 23 taken in the 2023-07 session issue). The scale includes 54 statements and participants' responses were evaluated using a 5-point Likert scale (5 = Strongly Agree, 4 = Agree, 3 = Undecided, 2 = Disagree, 1 = Strongly Disagree). Data collected from participants was analyzed using Smart PLS 4.0 [126] software. Structural equation modeling was used to analyze the scale questions containing 54 statements.

#### 4. Analysis Results

In the data analysis process, firstly, frequency analysis was carried out in the demographic data section of the survey. Then, measurement model analysis was applied to evaluate the reliability and validity of the scale dimensions in the second part of the survey. In the final stage of the research, the research model was tested using structural equation modeling.

##### 4.1. Demographic characteristics of survey participants

Information on the demographic characteristics of the survey participants is presented in Table 1. When Table 1 is examined, it is seen that women (51.06%) and men (48.94%) participated in the research at similar rates. It is seen that there are more married (54.61%) respondents than single respondents, and the age group that participated most in the research consists of participants between the ages of 35-44 (36.17%). When the educational status of the participants is examined, it is seen that there is a high participation rate of participants with postgraduate education (42.55%). When looking at the income distribution, it is seen that there are more participants between 20,001 TL and 30,000 TL (28.37%), and although private sector employees (37.59%) and public employees (41.13%) show similar participation, the number of public sector employees is higher. According to Table 1, it is seen that 68.79% of the participants who answered the research questions own a car.

In the first of the open-ended questions asked to consumers, they were asked "the first brand that comes to their mind when it comes to driverless cars" without giving any clues, and the participants answered Tesla at a high rate (70.21%). In the second open-ended question, the participants were asked which traditional car brand they would trust to choose a driverless car produced by, and again without any hints, the most common answers were Volvo (30.50%) and Mercedes-Benz (17.73%).

**Table 1.** Demographic Distribution of Participants

Characteristics		N	%
Gender	Male	69	48,94%
	Female	72	51,06%
Marital Status	Married	77	54,61%
	Single	64	45,39%
Age	≤ 25	21	14,89%
	25-34	44	31,21%
	35-44	51	36,17%
	45-54	21	14,89%
	≥ 55	4	2,84%
Education	Primary and Secondary Education	3	2,13%
	High School	15	10,64%
	Associate degree	14	9,93%
	Bachelor's degree	49	34,75%
	Master's and Doctoral degree	60	42,55%
Income (Turkish Lira / TRY)	≤ 10.000	11	7,80%
	10.001 – 20.000	22	15,60%
	20.001 – 30.000	40	28,37%
	30.001 – 40.000	32	22,70%
	40.0001 - 50.000	19	13,48%
Job	≥ 50.001	17	12,06%
	The Private Industry	53	37,59%
	The Public Sector	58	41,13%
	Student	11	7,80%
	Retired	2	1,42%
	Unemployed	3	2,13%
Participants who own a car	Other	14	9,93%
	Car Owner	97	68,79%
The first brand that comes to mind when it comes to driverless and autonomous cars	Not a Car Owner	44	31,21%
	Audi	2	1,42%
	BMW	3	2,13%
	Ferrari	1	0,71%
	None, I don't know, etc.	17	12,06%
	Honda	1	0,71%
	Mercedes-Benz	8	5,67%
	Porsche	2	1,42%
	Renault	1	0,71%
	Tesla	99	70,21%
	TOGG	3	2,13%
Which of the traditional automobile brands would you trust to produce a driverless car?	Volvo	4	2,84%
	Audi	7	4,96%
	BMW	8	5,67%
	None	7	4,96%
	Honda	3	2,13%
	Mercedes-Benz	25	17,73%
	Other (Ford, Hyundai, Mitsubishi, Peugeot, Renault, Seat, Suzuki)	9	6,38%
	Porsche	3	2,13%
	Tesla	8	5,67%
	TOGG	7	4,96%
	Toyota	13	9,22%
Total	Volkswagen	8	5,67%
	Volvo	43	30,50%
		141	100

#### 4.2. Measurement model analysis results

In this study, a variance-based structural equation modeling method known as PLS-SEM (Partial Least Squares- Structural Equation Modeling) was used. The PLS-SEM method offers several advantages. First, it has a high degree of statistical power compared to CB-SEM (Covariance-based structural equation modeling), making it useful for researchers [127]. In addition, PLS-SEM is computationally more efficient than CB-SEM, which is advantageous in analyzing high-dimensional data [128]. The PLS-SEM method is increasingly used in fields such as quality management and is finding a place as a standard method with increasing interest [129]. PLS-SEM has the ability to analyze predictive models even with small data, which makes this method suitable for the analysis of predictive research [130]. It also stands out as a method that enables the discovery of complex relationships by allowing researchers to simultaneously identify, predict, and create regression models for hidden connections between input data [131]. PLS-SEM is flexible and can handle different measurement model setups, providing researchers with greater flexibility in their analysis [132]. It can also process models with both

formative and reflective structures, making it suitable for the analysis of complex models [133]. Overall, PLS-SEM offers many advantages in terms of statistical power, ability to work with small samples, computational efficiency, flexibility, and ability to handle complex models.

**Table 2.** Measurement Model Analysis Results

Dimensions, Expressions and Abbreviations	Factor Loading	Cronbach's Alpha Value	Composite Reliability Value	Average Variance Extracted Value
<i><b>Anthropomorphism</b></i>				
Automobile artificial intelligence used for autonomous driving has its own minds/thoughts. (ANT1)	0,749	0,852	0,901	0,695
Automobile artificial intelligence used for autonomous driving has consciousness. (ANT2)	0,882			
Automobile artificial intelligence used for autonomous driving has emotions. (ANT3)	0,863			
Automobile artificial intelligence used for autonomous driving has its own free will. (ANT4)	0,834			
<i><b>Optimism</b></i>				
New technologies contribute to a better quality of life. (OPT1)	0,840	0,869	0,900	0,601
Technology gives people more control over their daily lives. (OPT3)	0,746			
I like technologies that allow me to adapt and organize work to my needs. (OPT6)	0,762			
Technology makes me more efficient in my profession. (OPT7)	0,764			
It is better to use products and services using the latest technologies than to use old technologies. (OPT9)	0,764			
I rely on technology to stay up to date on the issues I care about and stay on top of trends. (OPT10)	0,773			
<i><b>Innovativeness</b></i>				
People around me look to my knowledge for advice on new technologies. (INN1)	0,781	0,907	0,926	0,641
Generally, when a new technology emerges, I am one of the first in my circle of friends to use that technology. (INN2)	0,809			
I can usually understand new high-tech products and services without help from others. (INN3)	0,768			
I follow the latest technological developments in my areas of interest. (INN4)	0,856			
Solving and trying to understand high-tech devices gives me pleasure. (INN5)	0,844			
I realize that I have fewer problems than other people with the technological devices I use. (INN6)	0,793			
I prefer to use the most advanced technology available (INN7)	0,749			
<i><b>Discomfort</b></i>				
Caution should be exercised when replacing key people's duties with technology because new technology is unreliable. (DISCMF7)	0,890	0,629	0,841	0,727
I do not find it safe to do business with artificial intelligence. (DISCMF8)	0,813			
<i><b>Insecurity</b></i>				
I am concerned that the information I provide over the internet or to artificial intelligence may be misused by others. (INSCRT5)	0,733	0,822	0,872	0,579
When I call a business, I would rather speak to a human than to communicate with an automated AI system. (INSCRT7)	0,705			
When something is made autonomous or handed over to artificial intelligence, it is necessary to carefully check that the system does not make mistakes. (INSCRT8)	0,837			
Any transaction you make over the internet or to artificial intelligence must be confirmed later with a separate communication. (INSCRT9)	0,797			
I don't think it's safe to give personal information to AI tools. (INSCRT11)	0,723			
<i><b>Attitude Towards Use</b></i>				
It is a good idea to use artificial intelligence-supported autonomous cars for traveling or transportation. (ATT1)	0,794	0,899	0,930	0,769
I think that artificial intelligence-supported autonomous cars are a convenient tool that brings positive results to its users. (ATT2)	0,886			
I would be happy to use artificial intelligence-supported driverless (autonomous) cars. (ATT3)	0,907			
I think I would like to use artificial intelligence-supported driverless (autonomous) cars. (ATT4)	0,916			
<i><b>Intention to Use in the Future</b></i>				
I intend to use driverless cars for my travels in the near future. (INTENT1)	0,868	0,847	0,907	0,766
If I were to buy a car in the future, I would try driverless cars before deciding. (INTENT5)	0,837			
I am thinking of using driverless cars at the first opportunity. (INTENT6)	0,918			

Before proceeding with the research model analysis, the validity and reliability of the structures used in the study were evaluated. In this context, Cronbach Alpha coefficient and composite reliability (CR) coefficients were used for internal consistency reliability, and factor loadings of the statements and explained average variance values were calculated for convergent validity. If the factor loading of each statement exceeds the threshold value of 0.50, the Cronbach Alpha coefficient indicates high reliability between 0.70 and 0.90 and medium reliability between 0.50 and 0.70 [134,135]. It can be stated that the combined reliability (CR) should exceed the threshold value of 0.70. In addition, the average variance explained (AVE) value must exceed the threshold value of 0.50, these criteria are threshold values to ensure reliability and validity [136].

Expressions INT2, INT3, INT4, INSCRT1, INSCRT2, INSCRT3, INSCRT4, INSCRT6, INSCRT10, INN8, OPT2, OPT4, OPT5, OPT8 and OPT11, whose factor loadings did not exceed the threshold value of 0.50, were removed from the scale. The factor loadings of the remaining statements after the statements removed from the scale are above 0.50. As Table 2 is examined, it is seen that Cronbach's Alpha coefficient values are between 0.629 and 0.907, composite reliability (CR) values are between 0.841 and 0.926, and Average Variance explained (AVE) values are between 0.579 and 0.769. It can be stated that the values in the table are above the threshold values in the literature and the convergent validity criterion is met.

Criteria suggested by Fornell and Larcker (1981) [137] were used to determine discriminant validity. The discriminant validity results obtained according to these criteria are presented in Table 3.

**Table 3.** Discriminant Validity Results According to Fornell and Larcker Criteria

	<b>Anthropomorphism</b>	<b>Attitude</b>	<b>Discomfort</b>	<b>Innovativeness</b>	<b>Insecurity</b>	<b>Intention to Use</b>	<b>Optimism</b>
<b>Anthropomorphism</b>	<b>0,833</b>						
<b>Attitude</b>	0,304	<b>0,877</b>					
<b>Discomfort</b>	0,059	-0,444	<b>0,853</b>				
<b>Innovativeness</b>	0,128	0,352	-0,063	<b>0,801</b>			
<b>Insecurity</b>	-0,004	-0,347	0,497	-0,158	<b>0,761</b>		
<b>Intention to Use</b>	0,210	0,770	-0,294	0,368	-0,253	<b>0,875</b>	
<b>Optimism</b>	0,032	0,367	-0,293	0,293	-0,030	0,297	<b>0,775</b>

The results in Table 3 show that discriminant validity was met according to the Fornell and Larcker criterion. According to Table 3, since the square values of average value variance (AVE) explained are higher than the correlations with other structures, it can be stated that the structures measure different features and can be differentiated. This result shows that the structures used in the analysis are independent components and therefore the discriminant validity criterion is met.

The HTMT (Heterotrait-Monotrait Ratio) criterion proposed by Henseler (2017) [138] expresses the ratio of the correlations of expressions of all variables to the geometric averages of the correlations of expressions of the same variable. In order to ensure a valid model fit, HTMT coefficients should not exceed the threshold value of 1 [139]. When Table 4 is examined, it can be seen that the requirements of the HTMT criterion are met. Based on these results, it can be stated that the constructs used in the study have discriminant validity.

**Table 4.** Discriminant Validity Results According to HTMT Criteria

	<b>Anthropomorphism</b>	<b>Attitude</b>	<b>Discomfort</b>	<b>Innovativeness</b>	<b>Insecurity</b>	<b>Intention to Use</b>	<b>Optimism</b>
<b>Anthropomorphism</b>							
<b>Attitude</b>	0,339						
<b>Discomfort</b>	0,087	0,581					
<b>Innovativeness</b>	0,154	0,377	0,229				
<b>Insecurity</b>	0,096	0,385	0,686	0,198			
<b>Intention to Use</b>	0,244	0,842	0,407	0,413	0,280		
<b>Optimism</b>	0,150	0,395	0,382	0,326	0,118	0,331	

#### 4.1. Structural equation model analysis results

The structural equation model of the research is shown in Figure 3. PLS-SEM method (Partial Least Squares Method) was preferred to examine the research model. The data obtained was analyzed using the Smart PLS 4.0 statistical program. PLS algorithm was used to calculate linearity and path coefficients as well as R2 and f2 values showing the effect of the research model. Additionally, the Q2 variable was calculated with PLSpredict analysis to measure predictive power. Bootstrap analysis was used to evaluate the significance of PLS path coefficients. Bootstrapping analysis was used to calculate dimension-specific t values by removing 5000 subsamples from the sample. The results of the research model are presented in the structural equation model table shown in Table 5.



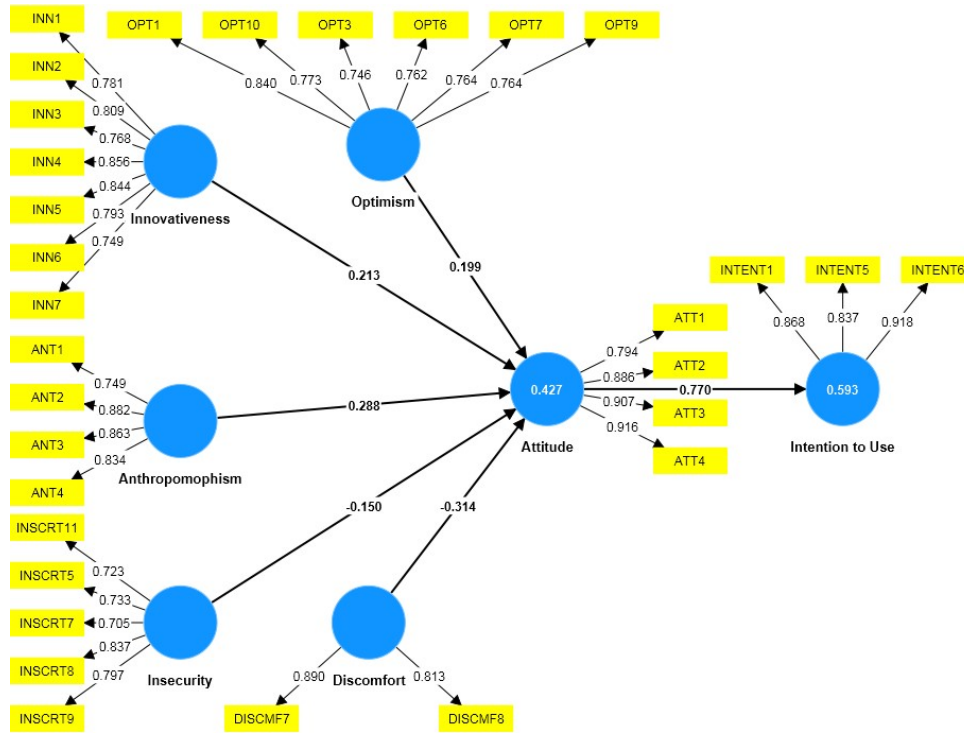


Figure 3. Measurement Model Analysis Results

Table 5. Structural Equation Modeling (PLS-SEM) Analysis Results

Hypothesis	Paths	Standardized $\beta$ Coefficient	Standard Error	t Value	P Value	Result
H <sub>1</sub>	Optimism -> Attitude	0,208	0,072	2,748	0,006	Accept
H <sub>2</sub>	Innovativeness -> Attitude	0,216	0,067	3,181	0,001	Accept
H <sub>3</sub>	Anthropomorphism -> Attitude	0,285	0,069	4,197	0,000	Accept
H <sub>4</sub>	Discomfort -> Attitude	-0,308	0,074	4,249	0,000	Accept
H <sub>5</sub>	Insecurity -> Attitude	-0,161	0,064	2,340	0,019	Accept
H <sub>6</sub>	Attitude -> Intention to Use	0,772	0,059	12,978	0,000	Accept

According to Table 5, the t values of the accepted hypotheses are above the threshold value of 1.96 and therefore all hypotheses were accepted. These results show that four of the hypotheses were supported in a statistically significant and positive manner. It shows that two of the hypotheses are supported in a statistically significant and negative way.

The study examined the impact of various factors on attitudes towards autonomous cars, revealing significant findings. Optimism ( $\beta=0.208$ ;  $p<0.05$ ), innovativeness ( $\beta=0.216$ ;  $p<0.05$ ), and anthropomorphism ( $\beta=0.285$ ;  $p<0.05$ ) were found to influence attitudes towards usage positively. Conversely, discomfort ( $\beta=-0.308$ ;  $p<0.05$ ) and insecurity ( $\beta=-0.161$ ;  $p<0.05$ ) were negatively associated with attitudes toward usage. Furthermore, a positive attitude towards usage ( $\beta=0.772$ ;  $p<0.05$ ) significantly increased the intention to use autonomous cars in the future. These results underscore the significance of individual perceptions and attitudes in shaping the acceptance of autonomous car technology.

These results show that all of the hypotheses of the research model are supported, that is, all of the latent dimensions affect the latent dimension of attitude towards use and the latent dimension of intention to use in the future. Table 6 below shows the  $R^2$ ,  $f^2$ ,  $Q^2$  and VIF values of the model.

There are different VIF values suggested in the literature to evaluate collinearity. While some studies recommend the maximum threshold value as 10 [140], others recommend a value below 5 [141-151]. In addition, there are studies that recommend a more stringent threshold value, such as below 3.3 [143,147,149,152]. According to Table 6, VIF values are below all threshold values in the literature. This result indicates that there is no multicollinearity problem between dimensions.

When the  $R^2$  values in the model are examined according to Table 6, it shows that consumers explain approximately 43% of the attitude towards using autonomous cars. The ratio of the attitude dimension towards using autonomous vehicles to explain the intention to use autonomous vehicles in the future is approximately 59%.

**Table 5.** R<sup>2</sup>, f<sup>2</sup>, Q<sup>2</sup> and VIF values of the Structural Equation Model

Hypothesis	Paths	R <sup>2</sup>	f <sup>2</sup>	Q <sup>2</sup>	VIF
H <sub>1</sub>	Optimism -> Attitude	0,427	0,056	0,368	1,238
H <sub>2</sub>	Innovativeness -> Attitude		0,069		1,154
H <sub>3</sub>	Anthropomorphism -> Attitude		0,142		1,022
H <sub>4</sub>	Discomfort -> Attitude		0,114		1,511
H <sub>5</sub>	Insecurity -> Attitude		0,028		1,410
H <sub>6</sub>	Attitude -> Intention to Use	0,593	1,458	0,216	1,000

According to Cohen (1988) [153], f<sup>2</sup> values greater than 0.02 represent a small effect size, greater than 0.15 represents a medium effect size, and greater than 0.35 represents a high effect size. According to Table 6, that can be said the dimensions of optimism (0.056), innovativeness (0.069), anthropomorphism (0.142), discomfort (0.114) and insecurity (0.028) have low f<sup>2</sup> values, while the effect size of attitude towards using autonomous cars (1.458) is high.

The Q<sup>2</sup> value obtained by PLSpredict analysis aims to evaluate the predictive power of the model by excluding the data of an indicator block from the model [154]. To determine that the model has a successful predictive power, Q<sup>2</sup> values must be greater than 0 (Q<sup>2</sup> > 0). 0 is considered a threshold value. According to Table 6, the Q<sup>2</sup> value of the optimism, innovation, anthropomorphism, discomfort and insecurity dimensions was found to be 0.368, and the Q<sup>2</sup> value of the attitude dimension towards using autonomous cars on the intention to use it in the future was found to be 0.216. According to the analysis results, since Q<sup>2</sup> values are above zero, it can be stated that the model has a successful predictive power for the relevant dimensions.

#### 4.2. Multiple group analysis results

In this section, the effect of categorical variables such as gender and age on the research model is examined. For this purpose, SmartPLS's multiple group analysis module was used to understand how the research model might change according to these categorical variables. The results of the multiple group analysis performed for the determined categorical variable are stated below, and these results are presented and evaluated under the following headings.

##### 4.4.1 Multiple group analysis results by gender

Multiple groups analyzes were applied to test the H7 hypothesis in the research model. It was investigated whether the six hypotheses put forward in the research model differ according to the gender variable. In this context, the data from the sample was divided into two different groups according to gender, one containing women (N = 72) and the other containing men (N = 69). Then, multiple group analysis was performed by gender.

The results of the analysis based on male and female participants are presented in Table 7, where the path coefficients, the differences between the path coefficients and the significance levels of the differences are shown in detail.

**Table 7.** Path Coefficients, Differences Between Path Coefficients and Significance Levels of Differences According to Gender Variable

Hypotheses	Paths	Standardized β Coefficient (Female)	Standardized β Coefficient (Male)	Difference Between Path Coefficients (Female - Male)	t Value (Female-Male)	p Value (Female-Male)
H <sub>7a</sub>	Optimism -> Attitude	0,263	0,158	0,105	0,729	0,460
H <sub>7b</sub>	Innovativeness -> Attitude	0,223	0,106	0,116	0,893	0,365
H <sub>7c</sub>	Anthropomorphism -> Attitude	0,232	0,428	-0,196	1,325	0,169
H <sub>7d</sub>	Discomfort -> Attitude	-0,192	-0,496	0,303	2,089	0,040
H <sub>7e</sub>	Insecurity -> Attitude	-0,280	-0,062	-0,218	1,590	0,110
H <sub>7f</sub>	Attitude -> Intention to Use	0,835	0,671	0,164	1,363	0,170

According to Table 7, in the H7d hypothesis of the differences between the path coefficients in terms of gender groups, it was found that there was a statistically significant difference between men and women (p = 0.040 < 0.05) in the effect of discomfort on the attitude towards use. The H7d hypothesis was accepted, the other hypotheses were rejected, and no significant difference was found according to gender in the other hypotheses.

Regarding the effect of discomfort on attitudes towards use, it is seen that male participants ( $\beta=-0.496$ ) have more negative attitudes than female participants ( $\beta=-0.192$ ) when they feel uncomfortable, and the difference between the path coefficients is 0.303. Additionally, when Table 7 is examined, it is seen that the t value of the accepted hypothesis is above the threshold value of 1.96.

#### 4.4.1 Multiple group analysis results by age

Multiple groups analyzes were applied to test the H8 hypothesis in the research model. It was investigated whether the six hypotheses put forward in the research model differ according to the age variable. In this context, the data from the sample was divided into two different groups according to age, one containing participants aged 34 and under ( $N = 65$ ) and the other containing participants aged 35 and over ( $N = 76$ ). Then, multiple group analysis by age was performed.

The results of the analysis based on participants aged 34 and under and 35 and over are presented in Table 8, where the path coefficients, the differences between the path coefficients and the significance levels of the differences are shown in detail.

**Table 8.** Path Coefficients According to Age Variable, Differences Between Path Coefficients and Significance Levels of Differences

Hypotheses	Paths	Standardized $\beta$ Coefficient (Ages 34 and under)	Standardized $\beta$ Coefficient (Ages 35 and above)	Difference Between Path Coefficients (34 years and below - 35 years and above)	t Value (34 years and below - 35 years and above)	p Value (34 years and below - 35 years and above)
H <sub>8a</sub>	Anthropomorphism -> Attitude	0,370	0,180	0,190	0,940	0,313
H <sub>8b</sub>	Attitude -> Intention to Use	0,658	0,861	-0,203	1,928	0,056
H <sub>8c</sub>	Discomfort -> Attitude	-0,299	-0,290	-0,008	0,056	0,948
H <sub>8d</sub>	Innovativeness -> Attitude	0,160	0,238	-0,077	0,492	0,631
H <sub>8e</sub>	Insecurity -> Attitude	-0,146	-0,209	0,064	0,441	0,663
H <sub>8f</sub>	Optimism -> Attitude	0,195	0,210	-0,015	0,091	0,944

According to Table 8, when the research model was examined according to the age variable, it was observed that there was no significant difference between the dimensions. Hypotheses H<sub>8a</sub>, H<sub>8b</sub>, H<sub>8c</sub>, H<sub>8d</sub>, H<sub>8e</sub> and H<sub>8f</sub> were rejected. According to the analysis results, the age variable does not affect consumers' technological readiness, attitude, and intention to use it in the future.

## 5. Results

The results of the research show that many factors significantly affect individuals' attitudes towards autonomous vehicle use. The research results coincide with the results of the literature examined in the study. First of all, optimism has a positive and significant effect on attitude towards usage. Optimistic individuals are more likely to have a positive attitude towards autonomous cars because they appreciate the advantages and benefits this technology offers [14]. Second, innovativeness also has a positive and significant effect on attitude towards usage. People who appreciate the innovative features of autonomous vehicles are more likely to have a positive view of the use of this technology [155]. Consumers find the technological developments brought by autonomous vehicles attractive and are more open to adopting them. Third, anthropomorphism has a positive and significant effect on attitude towards use. When autonomous cars have human-like behavior or user-friendly interfaces, individuals are more accepting of this technology [156]. This is a result that highlights the importance of designing autonomous cars with human-like characteristics to improve user experience and acceptance. On the other hand, discomfort and insecurity have negative and significant effects on attitudes towards use. Possible difficulties in the use of autonomous vehicles, security and privacy concerns lead individuals to develop negative attitudes towards the use of this technology [157,158]. Safety issues also play an important role in the adoption of autonomous vehicles [154]. Additionally, the study revealed that attitude towards use positively and significantly affects the intention

to use autonomous cars in the future. Individuals with positive attitudes towards autonomous cars are more likely to have the intention to use this technology in the future. This suggests a positive cycle in the acceptance of autonomous cars, where positive attitudes shape future usage intentions [159]. In summary, the results of the study show that optimism, innovativeness, and anthropomorphism have positive effects on attitudes towards autonomous vehicle use, while discomfort and insecurity have negative effects. However, based on the results of multi-group analysis, male participants have a more negative attitude than female participants when they feel uncomfortable about autonomous cars. Attitude towards use positively affects the intention to use autonomous cars in the future. These findings highlight the importance of considering individuals' attitudes and perceptions when designing and promoting autonomous vehicle technology. At this point, the following suggestions can be offered:

- Training and awareness programs should be organized to introduce driverless car technology to the society and raise awareness, especially by businesses that will enter the autonomous vehicle market. These programs should highlight the advantages and safety measures of autonomous vehicles, including technical aspects.
- To support the use of autonomous vehicles, campaigns and information efforts focusing on optimism, innovation and anthropomorphism should be carried out. Anthropomorphism, in particular, should be considered a key element that can help users form an emotional attachment to tools.
- Strategies should be developed to reduce feelings of discomfort and insecurity. The reliability and security measures of the technology should be explained to consumers and negative perceptions in the minds of consumers should be eliminated. For this purpose, marketing communication efforts should be used intensively by relevant businesses.
- Gender-sensitive campaigns and educational materials should be developed by taking gender differences into consideration. Especially situations where male participants feel uncomfortable should be addressed and insecurities in this regard should be tried to be eliminated.
- To increase the intention to use autonomous vehicles, improvements should be made to make it easier and more accessible.
- This issue should be further studied by researchers to further examine the effects of autonomous vehicles on society and pay attention to user feedback.

## 6. Conclusions and Discussion

Research results show that optimism positively affects attitudes towards using. Optimistic individuals have a more positive perspective on new technologies and artificial intelligence-supported autonomous cars. Since optimism is associated with hope and positive expectations for the future, it is understandable that these people are more open to new technologies and more willing to use them. In particular, individuals who believe that technology improves the quality of life see the advantages offered by artificial intelligence-supported autonomous cars and have a more positive attitude towards this technology. These findings indicate that optimism is an essential factor in the technology acceptance process and influences users' adoption and use of technology. The results show that innovativeness positively affects the attitude towards using. Innovative individuals have a more positive perspective on new technologies and artificial intelligence-supported autonomous cars. These people generally stand out with their interest in technology and ability to understand. Innovative individuals understand and use new products and services more efficiently by quickly adopting technology. Therefore, innovation ensures that individuals with a positive attitude towards new technologies, such as artificial intelligence-supported autonomous cars, are more willing to use these technologies. These findings indicate that innovativeness is an essential factor in the technology acceptance process and influences users' adoption and use of technology.

Research findings show that the idea of anthropomorphism positively affects attitudes towards using. Individuals with anthropomorphism views perceive artificial intelligence-supported autonomous cars more positively. These people may believe that artificial intelligence in cars has human-like characteristics, which causes them to have a more positive attitude toward technology. These findings suggest that anthropomorphism is essential in the technology acceptance process and influences how users perceive the technology.

Research findings show that the idea of discomfort negatively affects attitudes towards use. Individuals feeling discomfort perceive artificial intelligence-supported autonomous cars more negatively and avoid using this technology. The basis of this situation lies in individuals' security concerns about new technology. These results show that security concerns play an essential role in the users' technology acceptance process and

determine their attitudes toward using the technology. Another result is that insecurity negatively affects the attitude towards using. Individuals with a feeling of insecurity perceive artificial intelligence-supported autonomous cars more negatively and avoid using this technology. The basis of this situation lies in individuals' concerns about the risk of misuse of the information they share over the internet or with artificial intelligence and their security concerns. These results show that security concerns play an essential role in the users' technology acceptance process and determine their attitudes toward using the technology. In addition, according to the research results, consumers are more negatively affected by the discomfort than the distrust dimension.

The first brand question that comes to mind when talking about driverless and autonomous cars in the research was asked to evaluate the general awareness and image of consumers towards certain brands, to determine which brands the participants identify with driverless and autonomous cars, and as an indicator of how the market is shaped. At this point, the vast majority of the participants answered Tesla (70.21%). In the second answer, 12.06 participants stated that they did not know a brand on this subject or could not think of one. Currently, the Tesla brand has a dominant advantage among Turkish consumers. Another singular question: "If you were to buy a driverless car, which of the traditional car brands would you trust?" question was posed to the participants. In this question, Volvo (30.5%) and Mercedes-Benz (17.73%) were the preferred car brands. This question measured consumers' trust and preferences regarding driverless car technologies. This question aims to determine which traditional car brands are perceived by consumers as reliable and strong technology leaders, understand future preferences and market competition, and evaluate the impact of marketing strategies. Research findings show that attitude towards use strongly affects future intention to use. Users' intentions to use driverless cars are closely related to their development of a positive attitude towards this technology. These results show that users' development of a positive perspective towards driverless cars increases their intention to use this technology in the future. In particular, users' positive thoughts about using artificial intelligence-supported autonomous cars strengthen their intention to use driverless cars. Therefore, when evaluating users' intention to use driverless cars, it is important to focus primarily on the finding that their attitudes towards using them are positive.

## References

- [1] Yiğit E, Oner AE, Yöntem O. Otonom Araçların Otomotiv Sektörüne Etkileri ve Beraberinde Getirdiği Yenilikler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 2020 181-186.
- [2] Khayyam H, Javadi B, Jalili M, Jazar R N. Artificial intelligence and internet of things for autonomous vehicles. *Nonlinear Approaches in Engineering Applications: Automotive Applications of Engineering Problems*, 2020 39-68.
- [3] Tekin A T, Özkale L, Gültekin-Karakaş D. The Turkish automotive industry in the era of digital technologies and autonomous cars. *In Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019* (pp. 319-327). Springer International Publishing.
- [4] Alharbi A, Sohaib O. Technology readiness and cryptocurrency adoption: pls-sem and deep learning neural network analysis. *Ieee Access*, 2021, 9, 21388-21394. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3055785>
- [5] Lim H S M, Taeihagh A. Algorithmic decision-making in AVs: Understanding ethical and technical concerns for smart cities. *Sustainability*, 2019, 11(20), 5791.
- [6] Dokic J, Müller B, Meyer G. European roadmap smart systems for automated driving. *European Technology Platform on Smart Systems Integration*, 2015, 39.
- [7] Shi E, Gasser T M, Seeck A, Auerswald R. The principles of operation framework: A comprehensive classification concept for automated driving functions. *SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles*, 2020, 3(12-03-01-0003), 27-37.
- [8] Rojas Rueda D, Nieuwenhuijsen M J, Khreis H, Frumkin H. Autonomous vehicles and public health. *Annu Rev Public Health*. 2020, 2(41), 329-45.
- [9] Schwarting W, Alonso-Mora J, Rus D. Planning and decision-making for autonomous vehicles. *Annual Review of Control Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 1(1), 187-210. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-060117-105157>
- [10] Tastan Y, Kaymaz H. Otonom Araçların Önündeki Zorluklar. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 2021, 33(2), 195-209.
- [11] Kaur K, Rampersad G. Trust in driverless cars: Investigating key factors influencing the adoption of driverless cars. *Journal of Engineering and Technology Management*, 2018, 48, 87-96.
- [12] Schaefer K E, Straub E R. Will passengers trust driverless vehicles? Removing the steering wheel and pedals. *In 2016 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA)*. 2016, pp. 159-165. IEEE.
- [13] Du H, Zhu G, Zheng J. Why travelers trust and accept self-driving cars: An empirical study. *Travel behaviour and society*, 2021, 22, 1-9.
- [14] Hulse L, Xie H, Galea E. Perceptions of autonomous vehicles: relationships with road users, risk, gender and age. *Safety Science*, 2018, 102, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.001>

- [15] Moody J, Bailey N, Zhao J. Public perceptions of autonomous vehicle safety: An international comparison. *Safety science*, 2020, 121, 634-650.
- [16] Kyriakidis M, Happee R, de Winter J C. Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5000 respondents. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 2015, 32, 127-140.
- [17] Cunningham M L, Regan M A, Ledger S A, Bennett J M. To buy or not to buy? Predicting willingness to pay for automated vehicles based on public opinion. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, 2019, 65, 418-438.
- [18] Nair G S, Bhat C R. Sharing the road with autonomous vehicles: Perceived safety and regulatory preferences. *Transportation research part C: emerging technologies*, 2021, 122, 102885.
- [19] Pyrialakou V D, Gkartzonikas C, Gatlin J D, Gkritza K. Perceptions of safety on a shared road: Driving, cycling, or walking near an autonomous vehicle. *Journal of safety research*, 2020, 72, 249-258.
- [20] Martínez-Díaz M, Soriguera F. Autonomous vehicles: theoretical and practical challenges. *Transportation Research Procedia*, 2018, 33, 275-282.
- [21] Rajasekhar M V, Jaswal A K. Autonomous vehicle: The future of automobiles. In *2015 IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC)*, 2020, pp. 1-6. IEEE.
- [22] Yeong D J, Velasco-Hernandez G, Barry J, Walsh J. Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review. *Sensors*, 2021, 21(6), 2140.
- [23] Gökaşar İ, Dündar S. Sürücüsüz taşıtların trafik akım hızına etkisinin yapay sinir ağları ile incelenmesi. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 2018, 1(2), 56-71.
- [24] Harrington R, Senatore C, Scanlon J, Yee R. The role of infrastructure in an automated vehicle future. *Bridge*, 2018, 40(06).
- [25] Thrun S, Montemerlo M, Dahlkamp H, Stavens D, Aron A, Diebel J, Mahoney P, Stanley: the Robot That Won the Darpa Grand Challenge., 2007, 1-43. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73429-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73429-1_1)
- [26] Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, Baker C, Bittner R, Clark M, Ferguson D. Autonomous Driving In Urban Environments: *Boss and The Urban Challenge.*, 2009, 1-59. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03991-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03991-1_1)
- [27] Parasuraman A, Colby C. An updated and streamlined technology readiness index. *Journal of Service Research*, 2014, 18(1), 59-74. <https://doi.org/10.1177/1094670514539730>
- [28] Parasuraman A. Technology readiness index (tri). *Journal of Service Research*, 2000, 2(4), 307-320. <https://doi.org/10.1177/109467050024001>
- [29] Parasuraman A, Colby C L. An updated and streamlined technology readiness index: TRI 2.0. *Journal of service research*, 2015, 18(1), 59-74.
- [30] Sani A, Pusparini N, Budiyantera A, Irwansyah I, Hindardjo A. Investigating readiness attitude toward using mobile payment systems through technology acceptance model. *Jurnal Riset Informatika*, 2021, 3(3), 211-218. <https://doi.org/10.34288/jri.v3i3.233>
- [31] Wahyuni A, Juraida A, Anwar A. Readiness factor identification bandung city msme use blockchain technology. *Jurnal Sistem Dan Manajemen Industri*, 2021, 5(2), 53-62. <https://doi.org/10.30656/jsmi.v5i2.2787>
- [32] Lam S, Chiang J, Parasuraman A. The effects of the dimensions of technology readiness on technology acceptance: an empirical analysis. *Journal of Interactive Marketing*, 2008, 22(4), 19-39. <https://doi.org/10.1002/dir.20119>
- [33] Chen S, Chen H, Chen M. Determinants of satisfaction and continuance intention towards self-service technologies. *Industrial Management & Data Systems*, 2009, 109(9), 1248-1263. <https://doi.org/10.1108/02635570911002306>
- [34] Pradhan M, Oh J, Lee H. Understanding travelers' behavior for sustainable smart tourism: a technology readiness perspective. *Sustainability*, 2018, 10(11), 4259. <https://doi.org/10.3390/su10114259>
- [35] Dzulkifli F, Wahyuni E, Wicaksono G. Analisis kesiapan pengguna lective menggunakan metode technology readiness index (tri). *Jurnal Repositor*, 2020, 2(7), 923. <https://doi.org/10.22219/repositor.v2i7.676>
- [36] Yieh K, Chen J, Wei M. The effects of technology readiness on customer perceived value: an empirical analysis. *Journal of Family and Economic Issues*, 2012, 33(2), 177-183. <https://doi.org/10.1007/s10834-012-9314-3>
- [37] Shim H, Han S, Ha J. The effects of consumer readiness on the adoption of self-service technology: moderating effects of consumer traits and situational factors. *Sustainability*, 2020, 13(1), 95. <https://doi.org/10.3390/su13010095>
- [38] Moxley J, Czaja S. The factors influencing older adults' decisions surrounding adoption of technology: quantitative experimental study. *Jmir Aging*, 2022, 5(4), e39890. <https://doi.org/10.2196/39890>
- [39] Kim M, Son M. What determines consumer attitude toward green credit card services? a moderated mediation approach. *Sustainability*, 2021, 13(19), 10865. <https://doi.org/10.3390/su131910865>
- [40] Lee W, Lim Z, Tang L, Yahya N, Varathan K, Ludin S. Patients' technology readiness and whealth literacy. *Cin Computers Informatics Nursing*, 2021, 40(4), 244-250. <https://doi.org/10.1097/cin.0000000000000854>
- [41] Blut M, Wang C. Technology readiness: a meta-analysis of conceptualizations of the construct and its impact on technology usage. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 2019, 48(4), 649-669. <https://doi.org/10.1007/s11747-019-00680-8>
- [42] Csuka S, Martos T, Kapornaky M, Sallay V. Attitudes toward technologies of the near future: the role of technology readiness in a hungarian adult sample. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 2019, 16(06). <https://doi.org/10.1142/s0219877019500469>

- [43] Lara J, Novaes A, Afonso B, Tissot-Lara T. Chinese technology: a study of the image and the desire for possession, using the technology readiness index – tri scale. *International Journal of Innovation*, 2022, 10(4), 638-665. <https://doi.org/10.5585/iji.v10i4.21638>
- [44] Atkinson K, Westeinde J, Ducharme R, Wilson S, Deeks S, Crowcroft N, Wilson K. Can mobile technologies improve on-time vaccination? a study piloting maternal use of immunizeca, a pan-canadian immunization app. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 2016, 12(10), 2654-2661. <https://doi.org/10.1080/21645515.2016.1194146>
- [45] Bakirtaş H, Akkaş C. Technology readiness and technology acceptance of academic staffs. *International Journal of Management Economics and Business*, 2020, 16(4). <https://doi.org/10.17130/ijmeb.853629>
- [46] Kayser L, Rossen S, Karnoe A, Elsworth G, Vibe-Petersen J, Christensen J, Osborne R. Development of the multidimensional readiness and enablement index for health technology (readyh) tool to measure individuals' health technology readiness: initial testing in a cancer rehabilitation setting. *Journal of Medical Internet Research*, 2019, 21(2), e10377. <https://doi.org/10.2196/10377>
- [47] Thorsen I, Rossen S, Glümer C, Midtgaard J, Ried-Larsen M, Kayser L. Health technology readiness profiles among danish individuals with type 2 diabetes: cross-sectional study. *Journal of Medical Internet Research*, 2020, 22(9), e21195. <https://doi.org/10.2196/21195>
- [48] Atkinson K, Ducharme R, Westeinde J, Wilson S, Deeks S, Pascali D, Wilson K. Vaccination attitudes and mobile readiness: a survey of expectant and new mothers. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 2015, 11(4), 1039-1045. <https://doi.org/10.1080/21645515.2015.1009807>
- [49] Lai Y, Lee J. Integration of technology readiness index (tri) into the technology acceptance model (tam) for explaining behavior in adoption of bim. *Asian Education Studies*, 2020, 5(2), 10. <https://doi.org/10.20849/aes.v5i2.816>
- [50] Ramadhani S, Suroso A, Ratono J. Consumer attitude, behavioral intention, and watching behavior of online video advertising on youtube. *Jurnal Aplikasi Manajemen*, 2020, 18(3), 493-503. <https://doi.org/10.21776/ub.jam.2020.018.03.09>
- [51] Shim H, Han S, Ha J. The effects of consumer readiness on the adoption of self-service technology: moderating effects of consumer traits and situational factors. *Sustainability*, 2020, 13(1), 95. <https://doi.org/10.3390/su13010095>
- [52] Chen M, Lin N. Incorporation of health consciousness into the technology readiness and acceptance model to predict app download and usage intentions. *Internet Research*, 2018, 28(2), 351-373. <https://doi.org/10.1108/intr-03-2017-0099>
- [53] Matarirano O, Yeboah A, Gqokonqana O. Readiness of students for multi-modal emergency remote teaching at a selected south african higher education institution. *International Journal of Higher Education*, 2021, 10(6), 135. <https://doi.org/10.5430/ijhe.v10n6p135>
- [54] Mahmood A, Imran M, Adil K. Modeling individual beliefs to transfigure technology readiness into technology acceptance in financial institutions. *Sage Open*, 2023, 13(1), 21582440221149718. <https://doi.org/10.1177/21582440221149718>
- [55] Li N, Oyler D, Zhang M, Yıldız Y, Kolmanovsky I, Girard A. Game theoretic modeling of driver and vehicle interactions for verification and validation of autonomous vehicle control systems. *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(5), 1782-1797. <https://doi.org/10.1109/tcst.2017.2723574>
- [56] Xiao Y, Liu Z. Accident liability determination of autonomous driving systems based on artificial intelligence technology and its impact on public mental health. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2022/2671968>
- [57] Muhammad T, Kashmiri F, Yan H, Wang T, Lu H. A cellular automata model for heterogeneous traffic flow incorporating micro autonomous vehicles. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 1-21. <https://doi.org/10.1155/2022/8815026>
- [58] Muhammad T, Kashmiri F, Naem H, Xin Q, Chia-Chun H, Lu H. Simulation study of autonomous vehicles' effect on traffic flow characteristics including autonomous buses. *Journal of Advanced Transportation*, 2020, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2020/4318652>
- [59] Tan L, Ma C, Xu X, Xu J. Choice behavior of autonomous vehicles based on logistic models. *Sustainability*, 2019, 12(1), 54. <https://doi.org/10.3390/su12010054>
- [60] Asadi-Shekari Z, Saadi I, Cools M. Applying machine learning to explore feelings about sharing the road with autonomous vehicles as a bicyclist or as a pedestrian. *Sustainability*, 2022, 14(3), 1898. <https://doi.org/10.3390/su14031898>
- [61] Azevedo C, Marczuk K, Raveau S, Soh H, Adnan M, Basak K, Ben-Akiva M. Microsimulation of demand and supply of autonomous mobility on demand. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2016, 2564(1), 21-30. <https://doi.org/10.3141/2564-03>
- [62] Wu Z, Zhou H, Xi H, Wu N. Analysing public acceptance of autonomous buses based on an extended tam model. *Iet Intelligent Transport Systems*, 2021, 15(10), 1318-1330. <https://doi.org/10.1049/itr2.12100>
- [63] Zhang S, Jing P, Xu G. The acceptance of independent autonomous vehicles and cooperative vehicle-highway autonomous vehicles. *Information*, 2021, 12(9), 346. <https://doi.org/10.3390/info12090346>
- [64] Golbabaei F, Yigitcanlar T, Paz A, Bunker J. Individual predictors of autonomous vehicle public acceptance and intention to use: a systematic review of the literature. *Journal of Open Innovation Technology Market and Complexity*, 2020, 6(4), 106. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040106>

- [65] Huang T. Psychological factors affecting potential users' intention to use autonomous vehicles. *Plos One*, 2023, 18(3), e0282915. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282915>
- [66] Si H, Tan G, Zuo H. A deep coordination graph convolution reinforcement learning for multi-intelligent vehicle driving policy. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2022/9665421>
- [67] Girdhar M, Hong J, Moore J. (Cybersecurity of autonomous vehicles: a systematic literature review of adversarial attacks and defense models. *Ieee Open Journal of Vehicular Technology*, 2023, 4, 417-437. <https://doi.org/10.1109/ojvt.2023.3265363>
- [68] Ma Y, Wang Z, Yang H, Yang L. Artificial intelligence applications in the development of autonomous vehicles: a survey. *Ieee/Caa Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7(2), 315-329. <https://doi.org/10.1109/jas.2020.1003021>
- [69] Meidute-Kavaliauskiene I, Yildiz B, Çiğdem Ş, Çinçikaitė R. Do people prefer cars that people don't drive? a survey study on autonomous vehicles. *Energies*, 2021, 14(16), 4795. <https://doi.org/10.3390/en14164795>
- [70] Erskine M, Brooks S, Greer T, Apigian C. From driver assistance to fully-autonomous: examining consumer acceptance of autonomous vehicle technologies. *Journal of Consumer Marketing*, 2020, 37(7), 883-894. <https://doi.org/10.1108/jcm-10-2019-3441>
- [71] Becker F, Axhausen K. Literature review on surveys investigating the acceptance of automated vehicles. *Transportation*, 2017, 44(6), 1293-1306. <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9808-9>
- [72] Gabor B. Assessing self-driving vehicle awareness in Hungarian rejecting groups. *Deturope - The Central European Journal of Tourism and Regional Development*, 2022, 14(3), 129-143. <https://doi.org/10.32725/det.2022.025>
- [73] Nasır S, Özçelik S. Sürücüsüz araçlara yönelik tüketici tutumları. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 2017, 4(12), 590-603.
- [74] Yiğit E, Öner A E, Yöntem O. Otonom Araçların Otomotiv Sektörüne Etkileri ve Beraberinde Getirdiği Yenilikler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (Özel Sayı)*, 2020, 181-186.
- [75] Kocagöz E, İğde Ç S, Çetindağ G. Elektrikli ve akıllı, yerli ve milli: Türkiye'nin Otomobili Girişim Grubu'nun tanıttığı araçlara yönelik tüketicilerin ilk değerlendirmeleri. *Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 2020, (49), 55-74.
- [76] Aylak B, Oral O, Yazici K. Yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinin lojistik sektöründe kullanımı. *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*. 2020, <https://doi.org/10.31202/ecjse.776314>
- [77] Şener E. Autonomous-shared vehicle management system. *Politeknik Dergisi*, 2023, 26(1), 81-92. <https://doi.org/10.2339/politeknik.931490>
- [78] Semiz H, Öztürk E. Karayolu taşımacılığında otonom sürüş geçiş sürecinde türkiye'nin ihtiyaç duyacağı mevzuat değişiklikleri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 2023, 6(1), 1-21. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1141649>
- [79] Ecevit M. Son adım teslimat yöntemi olan otonom teslimat araçlarının tüketiciler tarafından kabulü: teknolojiye hazırlığın düzenleyici rolü. *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi*, 2023, 6(1), 166-183. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1256291>
- [80] Oğuz A, Aydemir M. Yapay potansiyel alan ile otonom araçların kavşak geçiş önceliğinin belirlenmesi. *European Journal of Science and Technology*. 2022, <https://doi.org/10.31590/ejosat.1040657>
- [81] Özçevik Y, Solmaz Ö, Baysal E, Ökten M. A real-time simulation environment architecture for autonomous vehicle design. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2023, 38(3), 1867-1878. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1030482>
- [82] Uçarlı A, İlçi V, Par K, Peker A. Otonom araçlarda çoklu gnss uydu sistemleri kullanımının konum doğruluğuna etkisinin araştırılması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 2022, <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1082124>
- [83] Akkaya S, Özbay H. Otonom araçların akıllı ulaşım politikaları üzerindeki etkileri. *Akıllı Ulaşım Sistemleri Ve Uygulamaları Dergisi*, 2022, 5(2), 200-210. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1160891>
- [84] Vandecasteele B, Geuens M. Motivated consumer innovativeness: concept, measurement, and validation. *International Journal of Research in Marketing*, 2010, 27(4), 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2010.08.004>
- [85] Soo S. Customers' intention to use robot-serviced restaurants in korea: relationship of coolness and mci factors. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 2020, 32(9), 2947-2968. <https://doi.org/10.1108/ijchm-01-2020-0046>
- [86] Jansson J. Consumer eco-innovation adoption: assessing attitudinal factors and perceived product characteristics. *Business Strategy and the Environment*, 2011, 20(3), 192-210. <https://doi.org/10.1002/bse.690>
- [87] Kim H, Fiore A, Niehm L, Jeong M. Psychographic characteristics affecting behavioral intentions towards pop-up retail. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 2010, 38(2), 133-154. <https://doi.org/10.1108/09590551011020138>
- [88] Esfahani M, Reynolds N. Impact of consumer innovativeness on really new product adoption. *Marketing Intelligence & Planning*, 2021, 39(4), 589-612. <https://doi.org/10.1108/mip-07-2020-0304>
- [89] Hirunyawipada T, Paswan A. Consumer innovativeness and perceived risk: implications for high technology product adoption. *Journal of Consumer Marketing*, 2006, 23(4), 182-198. <https://doi.org/10.1108/07363760610674310>



- [90] Shams R, Brown M, Alpert F. A model and empirical test of evolving consumer perceived brand innovativeness and its two-way relationship with consumer perceived product innovativeness. *Australasian Marketing Journal (Amj)*, 2020, 28(4), 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.ausmj.2020.04.006>
- [91] Albarrán I, Molina J, Gijón C. Perception of artificial intelligence in Spain. *Telematics and Informatics*, 2021, 63, 101672. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2021.101672>
- [92] Sohaib O, Hussain W, Asif M, Ahmad M, Mazzara M. A pls-sem neural network approach for understanding cryptocurrency adoption. *IEEE Access*, 2020, 8, 13138-13150. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2960083>
- [93] Pires P J, da Costa Filho B A, da Cunha J C. Technology readiness index (TRI) factors as differentiating elements between users and non users of internet banking, and as antecedents of the technology acceptance model (TAM). In ENTERprise Information Systems: International Conference, CENTERIS 2011, Vilamoura, Portugal, October 5-7, 2011, Proceedings, Part II (pp. 215-229). Springer Berlin Heidelberg.
- [94] Karayaman S. İyimserlik ve Değişime Direncin Endüstri 4.0 Uyum Yeteneği Üzerindeki Etkisi. *Sosyal, Beşeri Ve İdari Bilimler Dergisi*, 2023, 6(10), 1329-1347. <https://doi.org/10.26677/TR1010.2023.1317>
- [95] Sinha M, Majra H, Hutchins J, Saxena R. Mobile payments in India: the privacy factor. *The International Journal of Bank Marketing*, 2019, 37(1), 192-209. <https://doi.org/10.1108/ijbm-05-2017-0099>
- [96] Waytz A, Heafner J, Epley N. The mind in the machine: anthropomorphism increases trust in an autonomous vehicle. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2014, 52, 113-117. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2014.01.005>
- [97] Cheng P, Meng F, Yao J. Driving with agents: investigating the influences of anthropomorphism level and physicality of agents on drivers' perceived control, trust, and driving performance. *Frontiers in Psychology*, 2022, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.883417>
- [98] Tian Y, Wang X. A study on psychological determinants of users' autonomous vehicles adoption from anthropomorphism and utaut perspectives. *Frontiers in Psychology*, 2022, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.986800>
- [99] Niu D, Terken J, Eggen B. Anthropomorphizing information to enhance trust in autonomous vehicles. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2018, 28(6), 352-359. <https://doi.org/10.1002/hfm.20745>
- [100] Sonmez F, Nart S. Antropomorfizm: Kavramın Tarihi, Teoriler Ve Tüketici Davranışları Bağlamında Bir Literatür İncelemesi. *İnönü Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 2022, 11(2), 580-613.
- [101] Kamran H. Pazarlamada Yapay Zekânın Kullanımı: Yapay Zekâ Pazarlama Araçlarının Tüketici Kabulüne İlişkin Bir Araştırma (Doctoral dissertation, 2021, Bursa Uludağ University (Turkey))
- [102] Kuo K, Liu C, Ma C. An investigation of the effect of nurses' technology readiness on the acceptance of mobile electronic medical record systems. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 2013, 13(1). <https://doi.org/10.1186/1472-6947-13-88>
- [103] Shin S, Lee W. The effects of technology readiness and technology acceptance on nfc mobile payment services in Korea. *Journal of Applied Business Research (Jabr)*, 2014, 30(6), 1615. <https://doi.org/10.19030/jabr.v30i6.8873>
- [104] Yaygın H A, Tolay E. Teknolojik Hazır Bulunuşluğun Algılanan Çalışan Performansı Üzerindeki Etkisi: Otomotiv Sektöründe Bir Araştırma. *Journal of Business in The Digital Age*, 2023, 6(Özel Sayı), 57-65.
- [105] Lima E, Hopkins T, Gurney E, Shortall O, Lovatt F, Davies P, Kaler J. Drivers for precision livestock technology adoption: a study of factors associated with adoption of electronic identification technology by commercial sheep farmers in England and Wales. *Plos One*, 2018, 13(1), e0190489. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190489>
- [106] Roy S, Balaji M, Quazi A, Quaddus M. Predictors of customer acceptance of and resistance to smart technologies in the retail sector. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2018, 42, 147-160. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2018.02.005>
- [107] Chen M, Lin N. Incorporation of health consciousness into the technology readiness and acceptance model to predict app download and usage intentions. *Internet Research*, 2018, 28(2), 351-373. <https://doi.org/10.1108/intr-03-2017-0099>
- [108] Şekelli Z H. Dijital Dönüşüme Dair Algıların Teknolojiye Hazır Olma ve Kabul Modeli (TRAM) ile Analizi: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi MYO Öğrencileri Üzerinde Ampirik Bir Çalışma. *Bilge Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2022, 6(2), 78-89.
- [109] Anayat S, Rasool G, Pathania A. Examining the context-specific reasons and adoption of artificial intelligence-based voice assistants: a behavioural reasoning theory approach. *International Journal of Consumer Studies*, 2023, 47(5), 1885-1910. <https://doi.org/10.1111/ijcs.12963>
- [110] Wagner G, Raymond L, Paré G. Understanding prospective physicians' intention to use artificial intelligence in their future medical practice: configurational analysis. *Jmir Medical Education*, 2023, 9, e45631. <https://doi.org/10.2196/45631>
- [111] Dwivedi Y, Rana N, Jeyaraj A, Clement M, Williams M. Re-examining the unified theory of acceptance and use of technology (utaut): towards a revised theoretical model. *Information Systems Frontiers*, 2017, 21(3), 719-734. <https://doi.org/10.1007/s10796-017-9774-y>
- [112] Teo T, Zhou M, Noyes J. Teachers and technology: development of an extended theory of planned behavior. *Educational Technology Research and Development*, 2016, 64(6), 1033-1052. <https://doi.org/10.1007/s11423-016-9446-5>

- [113] Chin J, Do C, Kim M. How to increase sport facility users' intention to use ai fitness services: based on the technology adoption model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(21), 14453. <https://doi.org/10.3390/ijerph192114453>
- [114] Ho Y, Alam S, Masukujjaman M, Lin C, Susmit S, Susmit, S. Intention to adopt ai-powered online service among tourism and hospitality companies. *International Journal of Technology and Human Interaction*, 2022, 18(1), 1-19. <https://doi.org/10.4018/ijthi.299357>
- [115] Liang Y, Lee S, Workman J. Implementation of artificial intelligence in fashion: are consumers ready?. *Clothing and Textiles Research Journal*, 2019, 38(1), 3-18. <https://doi.org/10.1177/0887302x19873437>
- [116] Li K, Li Y, Franklin T. Preservice teachers' intention to adopt technology in their future classrooms. *Journal of Educational Computing Research*, 2016, 54(7), 946-966. <https://doi.org/10.1177/0735633116641694>
- [117] Cosmo L, Piper L, Vittorio A. The role of attitude toward chatbots and privacy concern on the relationship between attitude toward mobile advertising and behavioral intent to use chatbots. *Italian Journal of Marketing*, 2021, (1-2), 83-102. <https://doi.org/10.1007/s43039-021-00020-1>
- [118] Levay K, Freese J, Druckman J. The demographic and political composition of mechanical turk samples. *Sage Open*, 2016, 6(1), 215824401663643. <https://doi.org/10.1177/2158244016636433>
- [119] Sonnenschein S, Stites M, Ross A. Home learning environments for young children in the u.s. during covid-19. *Early Education and Development*, 2021, 32(6), 794-811. <https://doi.org/10.1080/10409289.2021.1943282>
- [120] Kock N, Hadaya P. Minimum sample size estimation in pls-sem: the inverse square root and gamma-exponential methods. *Information Systems Journal*, 2016, 28(1), 227-261. <https://doi.org/10.1111/isj.12131>
- [121] Savalei V. A comparison of several approaches for controlling measurement error in small samples. *Psychological Methods*, 2019, 24(3), 352-370. <https://doi.org/10.1037/met0000181>
- [122] Siahaan A, Thiodore J. Analysis influence of consumer behavior to purchase organic foods in Jakarta, 2022. <https://doi.org/10.2991/absr.k.220101.009>
- [123] Gursoy D, Chi O H, Lu L, Nunkoo R. Consumers acceptance of artificially intelligent (AI) device use in service delivery. *International Journal of Information Management*, 2019, 49, 157-169.
- [124] Rese A, Schreiber S, Baier D. Technology acceptance modeling of augmented reality at the point of sale: can surveys be replaced by an analysis of online reviews?. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2014, 21(5), 869-876.
- [125] Taylor S, Todd P A. Understanding information technology usage: A test of competing models. *Information systems research*, 1995, 6(2), 144-176.
- [126] Ringle C M, Wende S, Becker J-M. SmartPLS 4. Oststeinbek: SmartPLS GmbH, 2022, <http://www.smartpls.com>.
- [127] Hair J, Risher J, Sarstedt M, Ringle C. When to use and how to report the results of pls-sem. *European Business Review*, 2019, 31(1), 2-24. <https://doi.org/10.1108/eb-11-2018-0203>
- [128] Yuan K. Comments on the article "marketing or methodology? exposing the fallacies of pls with simple demonstrations" and pls-sem in general. *European Journal of Marketing*, 2023, 57(6), 1618-1625. <https://doi.org/10.1108/ejm-07-2021-0472>
- [129] Magno F, Cassia F, Ringle C. A brief review of partial least squares structural equation modeling (pls-sem) use in quality management studies. *The TQM Journal*. 2022, <https://doi.org/10.1108/tqm-06-2022-0197>
- [130] Buditjahjanto I. Analyzing factors of gui simulation as learning media toward students' learning outcomes. *Journal of Technology and Science Education*, 2022, 12(1), 83. <https://doi.org/10.3926/jotse.1317>
- [131] Khmeleva G, Kurnikova M, Nedelka E, Tóth B. Determinants of sustainable cross-border cooperation: a structural model for the hungarian context using the pls-sem methodology. *Sustainability*, 2022, 14(2), 893. <https://doi.org/10.3390/su14020893>
- [132] Hair Jr J, Hult G, Ringle C, Sarstedt M, Danks N, Ray S. An introduction to structural equation modeling. 2021, 1-29. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80519-7_1)
- [133] Prybutok G, Ta A, Liu X, Prybutok V. An integrated structural equation model of ehealth behavioral intention. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics*, 2020, 15(1), 20-39. <https://doi.org/10.4018/ijhisi.2020010102>
- [134] Taber K S. The use of Cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. *Research in Science Education*, 2018, 48, 1273-1296.
- [135] Eldrandaly K A, Naguib S M, Hassan M M. A model for measuring geographic information systems success. *Journal of Geographic Information System*, 2015, 7(4), 328.
- [136] Hair J F, Black W C, Babin B J, Anderson R E. *Multivariate data analysis* 2014, pp. 1-734. Eng: Pearson Education Limited.
- [137] Fornell C, Larcker D F. Structural equation models with unobservable variables and measurement error: Algebra and statistics. *Journal of Marketing Research*, 1981, 18(3), 382-388.
- [138] Henseler J. Partial least squares path modeling; *Advanced Methods for Modeling Markets*, 2017, ss. 361-381. Springer.
- [139] Garson G D. *Partial least squares. Regression and structural equation models*. Statistical Publishing Associates. 2016.

- [140] Oemar H, Prasetyaningsih E, Bakar S, Djamaludin D, Septiani A. Awareness and intention to register halal certification of micro and small-scale food enterprises. *F1000research*, 2023, 11, 170. <https://doi.org/10.12688/f1000research.75968.3>
- [141] Razavi-Termeh S, Sadeghi-Niaraki A, Choi S. Spatial modeling of asthma-prone areas using remote sensing and ensemble machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 2021, 13(16), 3222. <https://doi.org/10.3390/rs13163222>
- [142] Faisal C, Fernandez-Lanvin D, Andrés J, Gonzalez-Rodriguez M. Design quality in building behavioral intention through affective and cognitive involvement for e-learning on smartphones. *Internet Research*, 2020, 30(6), 1631-1663. <https://doi.org/10.1108/intr-05-2019-0217>
- [143] Ioannou A, Tussyadiah I. Privacy and surveillance attitudes during health crises: acceptance of surveillance and privacy protection behaviours. *Technology in Society*, 2021, 67, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101774>
- [144] Vargas P, González F, Landi V, Jurado J, Delgado-Bermejo J. Sexual dimorphism and breed characterization of creole hens through biometric canonical discriminant analysis across ecuadorian agroecological areas. *Animals*, 2019, 10(1), 32. <https://doi.org/10.3390/ani10010032>
- [145] Reddy C, Hamann R, Urban B. Country-level entrepreneurship: crowding out the population's need for autonomy. *Acta Commercii*, 2015, 15(1). <https://doi.org/10.4102/ac.v15i1.292>
- [146] Khokhar A. What decides women entrepreneurship in india?. *Journal of Entrepreneurship and Innovation in Emerging Economies*, 2019, 5(2), 180-197. <https://doi.org/10.1177/2393957519862465>
- [147] Ye M, Hao F, Shahzad M, Kamran H. How green organizational strategy and environmental csr affect organizational sustainable performance through green technology innovation amid covid-19. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.959260>
- [148] Fam S, Loh S, Musa H, Yanto H, Khoo L, Yong D. Overall equipment efficiency (oeo) enhancement in manufacture of electronic components & boards industry through total productive maintenance practices. *Matec Web of Conferences*, 2018, 150, 05037. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815005037>
- [149] Garg N, Talukdar A, Ganguly A, Kumar C. Knowledge hiding in academia: an empirical study of indian higher education students. *Journal of Knowledge Management*, 2021, 25(9), 2196-2219. <https://doi.org/10.1108/jkm-10-2020-0783>
- [150] Park K, Koh C. Effect of change management capability in real-time environment: an information orientation perspective in supply chain management. *Behaviour and Information Technology*, 2014, 34(1), 94-104. <https://doi.org/10.1080/0144929x.2014.945961>
- [151] Otieno F, Gachohi J, Gikuma-Njuru P, Kariuki P, Oyas H, Canfield S, Blackburn J. Modeling the potential future distribution of anthrax outbreaks under multiple climate change scenarios for kenya. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(8), 4176. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084176>
- [152] Luque-Vilchez M, Mesa-Pérez E, Husillos J, Larrinaga C. The influence of pro-environmental managers' personal values on environmental disclosure. *Sustainability Accounting Management and Policy Journal*, 2019, 10(1), 41-61. <https://doi.org/10.1108/sampj-01-2018-0016>
- [153] Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. 1988, 2nd Edition, Lawrence Erlbaum Associates, USA
- [154] Ali F, Amin M, Cobanoglu C. An integrated model of service experience, emotions, satisfaction, and price acceptance: An empirical analysis in the Chinese hospitality industry. *Journal of Hospitality Marketing & Management*, 2016, 25(4), 449-475.
- [155] Payre W, Cestac J, Delhomme P. Intention to use a fully automated car: attitudes and a priori acceptability. *Transportation Research Part F Traffic Psychology and Behaviour*, 2014, 27, 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.04.009>
- [156] Staufenbiel T, König C. A model for the effects of job insecurity on performance, turnover intention, and absenteeism. *Journal of Occupational and Organizational Psychology*, 2010, 83(1), 101-117. <https://doi.org/10.1348/096317908x401912>
- [157] Nordhoff S, Winter J, Kyriakidis M, Arem B, Happee R. Acceptance of driverless vehicles: results from a large cross-national questionnaire study. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 1-22. <https://doi.org/10.1155/2018/5382192>
- [158] Salonen A, Haavisto N. Towards autonomous transportation. passengers' experiences, perceptions and feelings in a driverless shuttle bus in finland. *Sustainability*, 2019, 11(3), 588. <https://doi.org/10.3390/su11030588>
- [159] Cugurullo F, Acheampong R, Guériaud M, Dusparić I. The transition to autonomous cars, the redesign of cities and the future of urban sustainability. *Urban Geography*, 2020 42(6), 833-859. <https://doi.org/10.1080/02723638.2020.1746096>



## Effects of Porosity and Boron Reinforcement in AISI 316L Stainless Steel for Biomedical Applications

Bünyamin AKSAKAL<sup>1</sup>, Naim ASLAN<sup>2\*</sup>, Ferzan FİDAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Aviation, Fırat University, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Machine and Metal Technology, Tunceli Vocational High School, Munzur University, Tunceli, Türkiye

<sup>3</sup>100/2000 YÖK (Council of Higher Education) doctoral bursary recipient, Institute of Post Graduate Education,

Department of Strategic Raw Materials and Advanced Technology Applications, Munzur University, Tunceli, Türkiye

<sup>1</sup>baksakal@firat.edu.tr, <sup>2</sup>naimaslan@munzur.edu.tr, <sup>3</sup>fidanferzan88@gmail.com

(Geliş/Received: 06/11/2023;

Kabul/Accepted: 22/03/2024)

**Abstract:** AISI 316L stainless steel (SS) is one of the most widely used biomaterials in the manufacture of implants and biomaterials. It has advantages over equivalent biomaterials such as low cost, good mechanical properties and biocompatibility. The pores found in porous biomaterials provide mechanical interlock, ensuring strong attachment of the implant to the tissue. In this study, 20%, 30% and 40% by volume of polyvinyl alcohol (PVA) and Boron powder were added into 316L powder to obtain porous SS implant. To investigate the effect of porosity and boron effect on the stainless-steel implant material, the samples produced in PVA and Boron added groups, were sintered at 1180 °C under an argon atmosphere. With the evaporation of PVA in the structure, porous and boron added samples were obtained in two groups. Finally, the samples were subjected to Brinell hardness and compression tests and analyzed by SEM, EDS and XRD. As a result of the hardness tests, the highest values were measured as 37.006, 31.32, 25.28 HB. 39.5, 34.5, 26.2 MPa strengths were measured for 20%, 30% and 40% porous samples respectively.

**Keywords:** AISI 316L stainless steel, boron, powder metallurgy, space holder, mechanical properties

### Biyomedikal Uygulamalarda AISI 316L Paslanmaz Çelik için Gözeneklilik ve Bor Takviyesinin Etkileri

**Öz:** AISI 316L paslanmaz çelik (SS), implant ve biyomalzeme üretiminde en yaygın kullanılan metalik biyomalzemelerden biridir. Muadil biyomateryallerle kıyaslandığında düşük maliyet, iyi mekanik özellik ve biyouyumluluk gibi avantajları mevcuttur. Gözenekli biyomalzemelerde bulunan gözenekler mekanik bir kenetlenme sağlayarak implantın dokuya güçlü bir şekilde tutunmasını sağlar. Bu çalışmada gözenekli SS implant elde etmek için 316L alaşım tozu içerisine hacimce %20, %30 ve %40 oranında polivinil alkol (PVA) ve Bor ilave edildi. Paslanmaz çelik implant malzemesi üzerinde gözeneklilik ve bor etkisinin araştırılması amacıyla PVA ve Bor katkı gruplarında üretilen numuneler, 1180 °C' de argon atmosferi altında sinterlenmiştir. Yapıdaki PVA'nın buharlaştırılmasıyla iki grup halinde gözenekli ve bor katkı numuneler elde edildi. Son olarak numuneler Brinell sertlik ve basma testlerine tabi tutularak SEM, EDS ve XRD analizleri yapıldı. Sertlik testleri sonucunda en yüksek değerler 37.006, 31.32, 25.28 HB olarak ölçülmüştür. Basma dayanımı ise %20, %30 ve %40 gözenekli numuneler için sırasıyla 39.5, 34.5, 26.2 MPa olarak ölçülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** AISI 316L paslanmaz çelik, bor, toz metalurjisi, boşluk tutucu yöntem, mekanik özellikler

## 1. INTRODUCTION

Bioimplants play an important role in improving the quality of human life. Historically, there are documents indicating that the Egyptians and Romans developed various implantation practices for dental applications as early as four thousand years ago [1]. However, the systematization of these practices into the science of implantology did not begin until the late 18th century [2]. The development of implants with superior mechanical and physical properties is closely related to the development of implant science [3]. In 1969, the science of biomaterials made a breakthrough in the scientific world and has attracted great interest in recent years [4]. From this point of view, the correct choice of biomaterial is crucial in terms of implant production, mechanical properties, cost and long-term use [5], [6].

Metallic biomaterials account for more than 70% of existing biomaterials and medical devices [7], [8]. Metallic biomaterials as researchers prefer implant materials due to their superior mechanical properties in long-term implantation applications [9], [10]. Commonly used metallic biomaterials include Ti6Al4V, Co-Cr alloys and 316L stainless steel [11]. Due to its low cost, ideal corrosion resistance and ease of use, 316L stainless steel has

\* Sorumlu yazar: naimaslan@munzur.edu.tr. Yazarların ORCID numaraları: <sup>1</sup>0000-0003-4844-9387, <sup>2</sup>0000-0002-1159-1673, <sup>3</sup>0000-0002-1913-2535

attracted considerable attention in implant fabrication [12], [13]. Implants made of these materials are less expensive than titanium and cobalt-based implants [14], [15].

There is a lot of research on the eutectic reaction between austenitic stainless-steel matrix and boron. In general, it has become possible to produce almost completely dense materials with very low levels of boron addition (0.2-0.8 wt%) [16-19]. However, although it is necessary to go to high densities to improve mechanical properties in powder metallurgy applications, the pores formed in the structure of sintered stainless-steel cause a decrease in the mechanical property values [20]. Many studies have reported that the addition of boron to metal powder reduces the amount of porosity after sintering. While the liquid phase formed because of the eutectic reaction between iron and boron improves sintering, complex borides such as FeB, Ni<sub>2</sub>B, CrB and Fe<sub>2</sub>B formed in the material improve mechanical properties [21].

Powder metallurgy is one of the main fabrication methods used to produce porous structures due to its ability to combine different components and low cost [22], [23]. The low cost, precise fabrication, and ability to adjust pore size and quantity have made powder metallurgy and space-holder methods favored by researchers in recent times [24], [25].

In this study, 316L scaffold structures with 20%, 30% and 40% porosity were fabricated using the PVA space holder and powder metallurgy method due to its superior bonding and layering properties. On the other hand, to investigate the effect of boron on 316L stainless steel, 20%, 30% and 40% boron added 316L metallic structures were fabricated and their morphological, structural and mechanical properties were investigated.

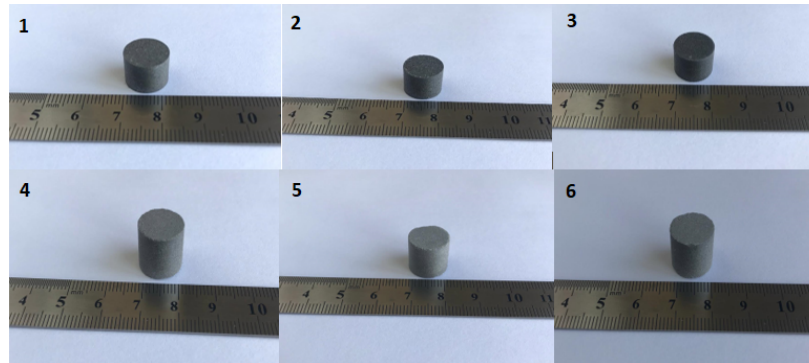
## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Production of Porous SS Structures

316L (45 µm, Goodfellow) powders were used as matrix material, PVA (100-150 µm, Sigma Aldrich) particles as a space holder and boron (100 µm, Merck) as reinforcing material at 20, 30 and 40% by volume. In the structures prepared in two groups, porous and boron added, PVA and boron were added to the matrix material at 20%, 30% and 40% by volume. The polymeric binder PEG400 was used to ensure the binding of the materials in the mixture. The prepared powders were mixed in a ball mixer at a speed of 210 rpm for 1 hour. The resulting blends were then subjected to cold pressing at a pressure of 350 MPa. The images of the green reinforced samples are shown in Figure 1. The pressed PVA and boron added samples were sintered under argon gas in a controlled atmosphere furnace at 1180 °C for 3 hours. The parameters at the stage of structural production of the samples obtained are given in table 1.

**Table 1.** Classification of the structural properties of the samples obtained.

Group no:	Notation	316L(SS) (%vol.)	Boron (B) (%vol.)	PVA (%vol.)	Stearic acid (% wt.)	Pressure (kN)
1	80SS/20B	80	20	-	1	4
2	70SS/30B	70	30	-	1	4
3	60SS/40B	60	40	-	1	4
4	80SS/20PVA	80	-	20	1	3
5	70SS/30PVA	70	-	30	1	3
6	60SS/40PVA	60	-	40	1	3



**Figure 1.** Images of sample groups with green compact

For structural characterization of the sintered samples, X-ray diffraction (XRD, Rigaku miniflex600) patterns were taken at a scanning rate of 2 degrees/min and a range of 10-80 degrees. Scanning electron microscopy (Hitachi SU3500) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS, Oxford) coupled to SEM were used for morphological and elemental analysis. Tensile testing (100 kN, Shimatsu) was used for compressive strength.

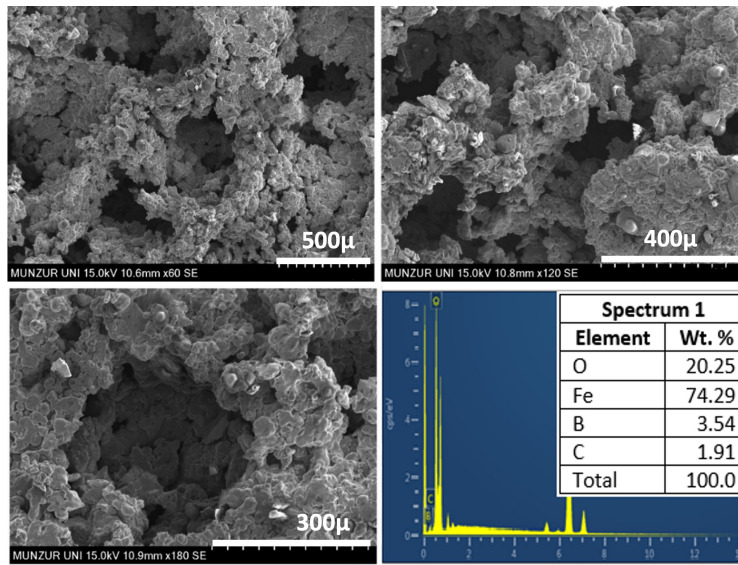
### 3.RESULT AND DISCUSSION

#### 3.1. Morphological and Structural Characterizations

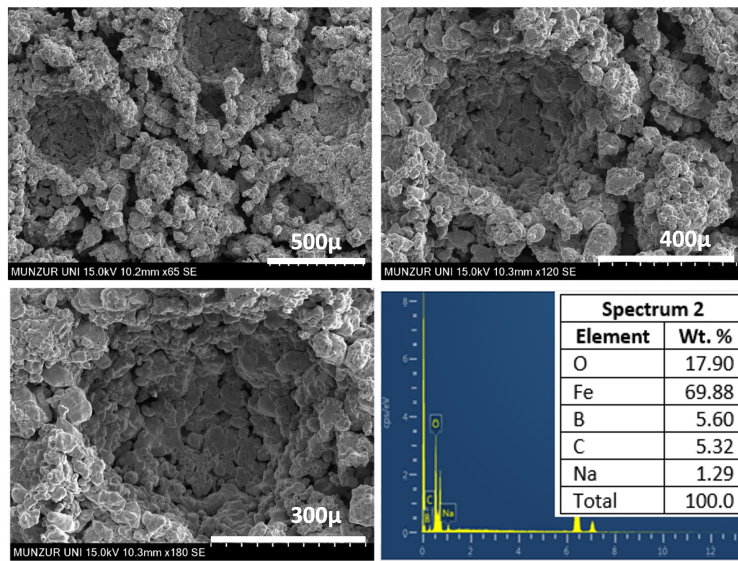
Structures based on 316L stainless steel with 20%, 30%, 40% by volume PVA space holder and boron added were prepared in two groups. The porosity density of the porous samples is calculated with the Archimedes principle and given in Table 2. Examination of the table shows that the sintering process removes almost all of the PVA from the structure of the porous specimens. SEM-EDS images of the boron doped samples are shown in Figures 2, 3 and 4. The images show that the metallurgy bonding is not fully realized in the sample structures. The literature indicates that adding boron increases the structure's density and enhances sintering [20], [26-28]. In the present study, although better bonding in the microstructure was expected with increasing boron addition, the desired result was not achieved. This is thought to be due to the insufficient sintering temperature applied.

**Table 2.** Porosity and density of the resultant samples.

Notation	Mass before sintering (g)	Mass after sintering (g)	Density before sintering (g/cm <sup>3</sup> )	Density after sintering (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity %
80SS/20PVA	3.5	2.86	3.09	2.53	19%
70SS/30PVA	3.4	2.4	3	2.12	30%
60SS/40PVA	3.6	2.2	3.18	1.94	39%

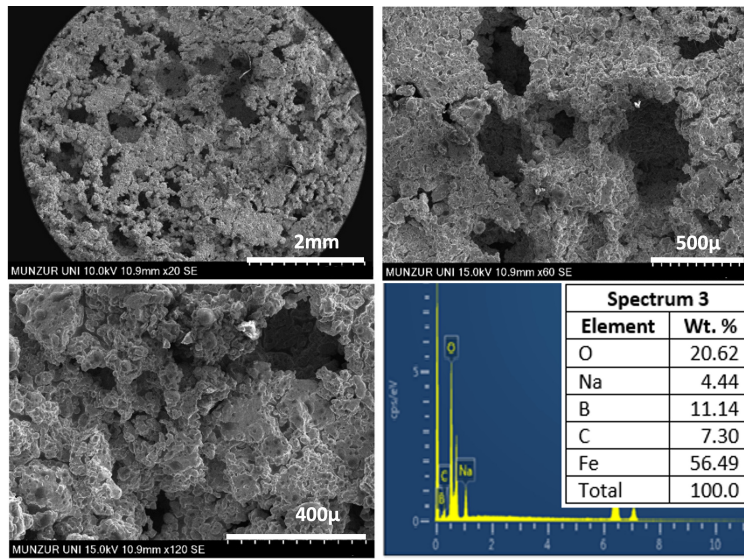


**Figure 2.** SEM images and EDS spectrum of 80SS/20B sample



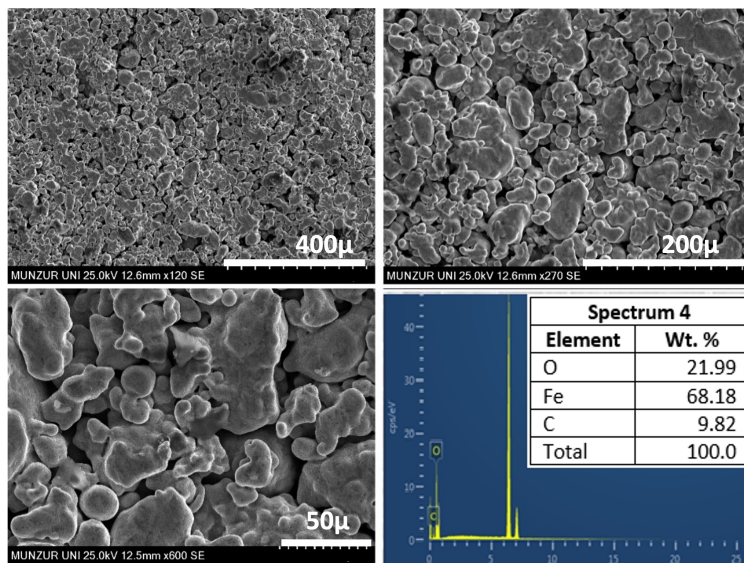
**Figure 3.** SEM images and EDS spectrum of 70SS/30B sample





**Figure 4.** SEM images and EDS spectrum of 60SS/40B sample

Figures 5, 6 and 7 show SEM-EDS images of the porous structures of the other sample group produced with the PVA space holder. The figures show that there is better metallurgical bonding in all sample groups compared to the boron samples. This shows that the amount of intergranular constriction decreases as the porosity increases. This situation again indicates that the sintering temperature is insufficient. The presence of the C peak in the EDS spectra of the boron added samples can be attributed to the carbon in the matrix material. On the other hand, the high C peaks seen in the EDS spectra of the porous structures indicate that PVA, a C-based synthetic polymer [29], does not completely evaporate from the structure during sintering but remains in the pores. In addition, when the EDS spectra of both groups of samples are analysed, O peaks are detected in the structures. This situation can be evaluated separately for both groups of samples. In the porous samples, O peaks were formed because the structure was oxidised during sintering. On the other hand, the formation of  $B_2O_3$  structures in the structure after 450 °C in boron added samples [30] is another reason for the formation of O peaks.



**Figure 5.** SEM images and EDS spectrum of 80SS/20PVA sample

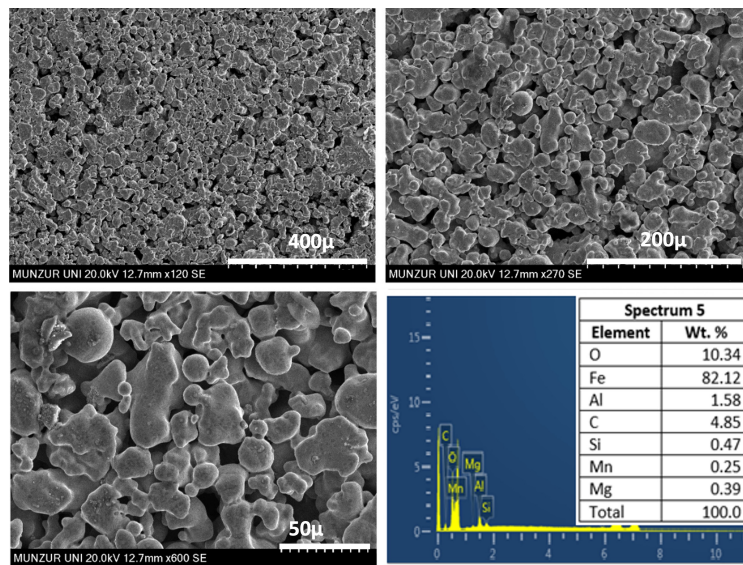


Figure 6. SEM images and EDS spectrum of 70SS/30PVA sample

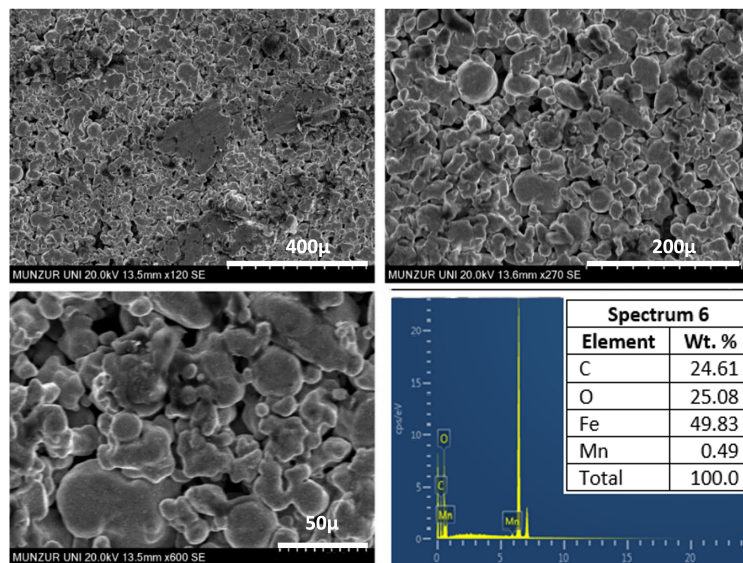


Figure 7. SEM images and EDS spectrum of 60SS/40PVA sample

X-ray diffraction patterns were used to determine the elemental analysis of the structures obtained. XRD spectra of samples added with 20% by volume boron and PVA are shown in Figure 8. As can be seen from the figure, characteristic peaks belonging to  $B_2O_3$  formed by heat treatment were observed [29-31]. The sharpness of the austenite peaks in the spectrum can be related to the characteristic of the austenitic stainless steel 316L. Literature shows that heat treatment at 800-900 degrees leads to a single-phase austenitic phase, whereas at temperatures of 1100 degrees and above, an austenite-ferrite phase composition is obtained [32]. In this context, the presence of a small amount of ferrite phase in the XRD spectra obtained is indicative of austenite to ferrite transformation. On the other hand, the sharp peaks of stainless steel can be explained by the presence of crystallinity of the structure.

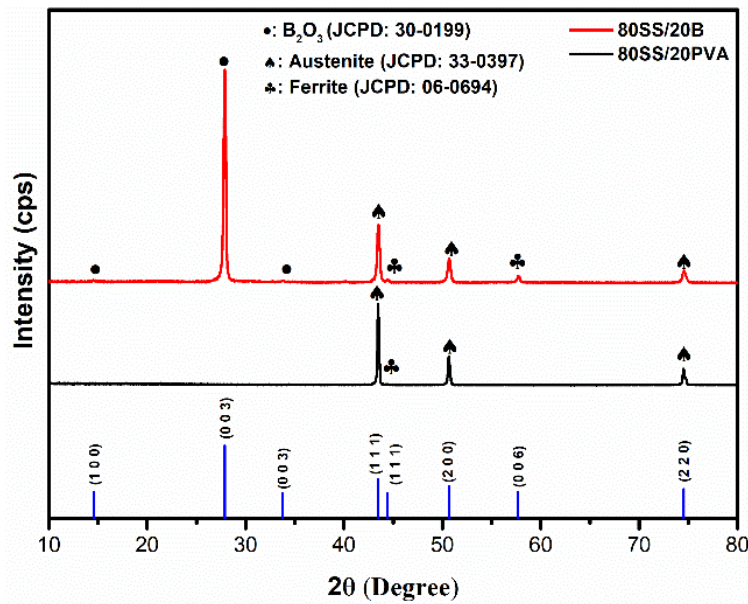


Figure 8. XRD analysis result of 80SS/20B and 80SS/20PVA samples

### 3.2. Mechanical Measurements

The Brinell hardness test was applied to the obtained porous and boron added samples and the values obtained are shown in Figure 9. Analyzing the plots, we see that the best hardness value is obtained in 80SS/20PVA sample with 37.006 HB. In the boron added samples, the hardness results were quite low due to the inadequacy of the metallurgical bond. On the other hand, the compression test was carried out on the porous samples and force-extension values were obtained. The stress-strain curves of these force-strain values are shown in Figure 10. Analysis of the graph shows that the compressive strength values of the 20%, 30% and 40% porous specimens were 39.5, 34.5 and 26.2 MPa respectively. According to reports, sintering conditions above the eutectic temperature (above 1200 °C), the liquid phase sintering mechanism occurs and the formation of complex borides in the structure because of the eutectic reaction between the stainless-steel matrix and boron improves sintering [32], [33]. In this study, as the sintering temperature was below 1200 °C, the liquid phase sintering mechanism was not formed and full metallurgical bonding could not be achieved. For this reason, the compression test could only be applied to porous specimens. On the other hand, a study in the literature investigated the effect of porosity on the compressive strength of stainless steel [34]. In the study, specimens with 40%, 46% and 50% porosity were prepared and measured to be 32, 25 and 20 MPa respectively. The decrease in compressive strength with increasing porosity supports our study. Although the closest value to cancellous bone with a compressive strength value between 2-12 MPa [33] was obtained in the 60SS/40PVA specimen, inadequate metallurgical bonding is not a desirable situation.

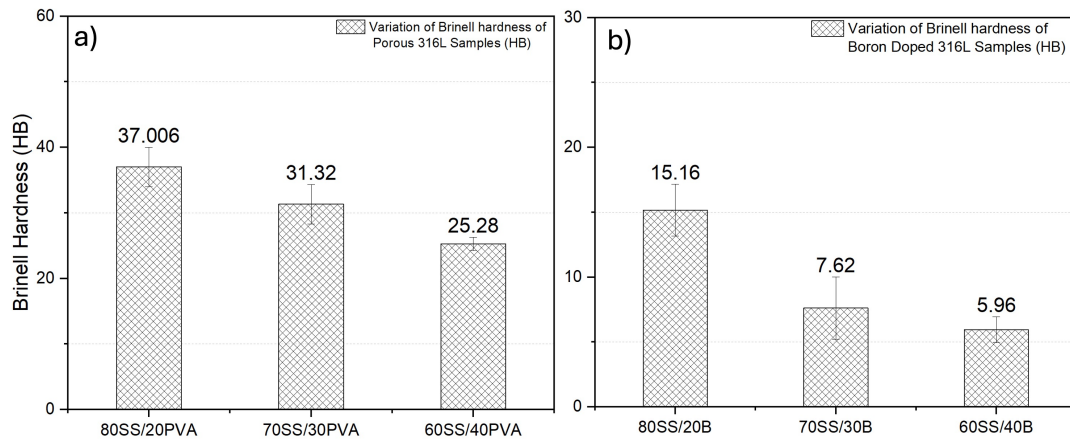


Figure 9. Brinell hardness data for (a) porous and (b) boron added samples

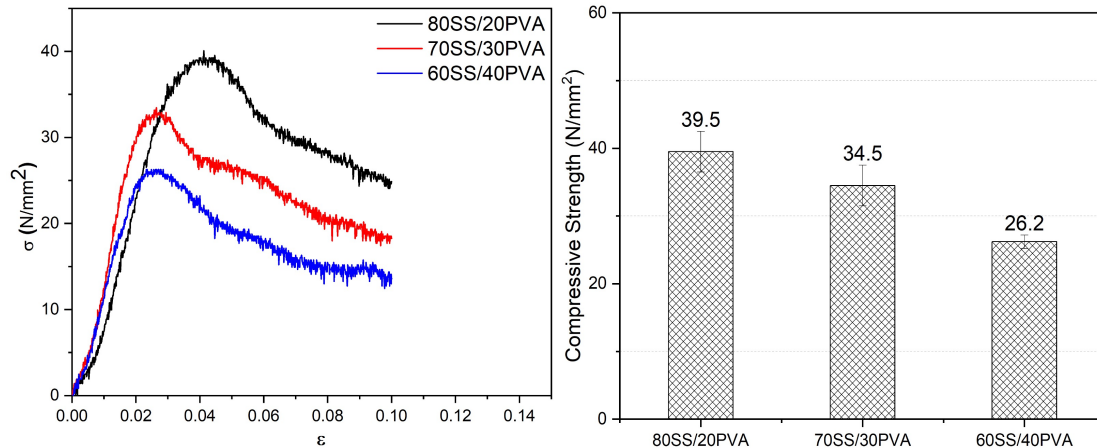


Figure 10. (a) stress-strain curve and (b) compressive strength values of porous samples

#### 4. CONCLUSIONS

PVA and boron added 20%, 30% and 40% by volume samples were prepared and two groups of samples, 20%, 30% and 40% porous and boron added, were obtained by evaporation of PVA into the structures of PVA added samples during sintering. The morpho-structural and mechanical properties of 20%, 30% and 40% volume boron added and porous specimens were investigated and the effect of different pore and boron adding ratios on these properties of 316L stainless steel was studied. As a tube furnace with a capacity of 1200 °C was used in the studies, the sintering process was carried out at 1180 °C. Due to the insufficient sintering temperature and the inability to reach higher temperatures, the morpho-structural characterization results show that complete metallurgical bonding could not be achieved in boron added samples. On the other hand, it is observed that intergranular bonds are formed in porous samples. The decrease in intergranular bonding with increasing porosity again reveals the inadequacy of the heat treatment temperature. As a result of XRD analysis,  $B_2O_3$  peaks were clearly formed in the structure due to heat treatment in boron added samples. In the Brinell hardness test results, the best values were obtained in porous samples due to the formation of intergranular bonds in the structure. In the compression test applied to porous samples, the highest strength was obtained as 39.5 MPa in 80SS/20PVA sample, while the lowest strength was measured as 26.2 MPa in 60SS/40PVA sample.

## References

- [1] Manivasagam G, Dhinasekaran D, Rajamanickam A. "Biomedical Implants: Corrosion and its Prevention - A Review," *Recent Patents Corros. Sci.*, 2010; vol. 2, no. 1, pp. 40–54.
- [2] Luthringer BJC, Feyerabend F, Willumeit-Römer R. "Magnesium-based implants: a mini-review," *Magnes. Res.*, 2014; vol. 27, no. 4, pp. 142–54.
- [3] Ali S *et al.* "Biocompatibility and corrosion resistance of metallic biomaterials," *Corros. Rev.*, 2020; vol. 38, no. 5, pp. 381–402.
- [4] Geetha M, Singh AK, Asokamani R, Gogia AK. "Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants - A review," *Prog. Mater. Sci.*, 2009; vol. 54, no. 3, pp. 397–425.
- [5] Kang CW, Fang FZ. "State of the art of bioimplants manufacturing: part II," *Adv. Manuf. 2018 62*, vol. 6, no. 2, pp. 137–154.
- [6] Al-Amin M *et al.* "Investigation of Coatings, Corrosion and Wear Characteristics of Machined Biomaterials through Hydroxyapatite Mixed-EDM Process: A Review," *Mater. 2021, Vol. 14, Page 3597*, vol. 14, no. 13, p. 3597.
- [7] Mahapatro A. "Metals for biomedical applications and devices," *J. Biomater. Tissue Eng.*, 2012; vol. 2, no. 4, pp. 259–268.
- [8] Okazaki Y. "Selection of metals for biomedical devices," *Met. Biomed.*, 2019; *Devices*, pp. 31–94.
- [9] Patnaik L, Maity SR, Kumar S. "Status of nickel free stainless steel in biomedical field: A review of last 10 years and what else can be done," *Mater. Today Proc.*, 2019; vol. 26, pp. 638–643.
- [10] Gabilondo M, Cearsolo X, Arrue M, Castro F. "Influence of Build Orientation, Chamber Temperature and Infill Pattern on Mechanical Properties of 316L Parts Manufactured by Bound Metal Deposition," *Mater. 2022, Vol. 15, Page 1183*, vol. 15, no. 3, p. 1183.
- [11] Motallebzadeh A, Peighambaroust NS, Sheikh S, Murakami H, Guo S, Canadinc D. "Microstructural, mechanical and electrochemical characterization of TiZrTaHfNb and Ti1.5ZrTa0.5Hf0.5Nb0.5 refractory high-entropy alloys for biomedical applications," *Intermetallics*, 2019; vol. 113, p. 106572.
- [12] Essa K, Jamshidi P, Zou J, Attallah MM, Hassanin H. "Porosity control in 316L stainless steel using cold and hot isostatic pressing," *Mater. Des.*, 2018; vol. 138, pp. 21–29.
- [13] Ali S *et al.* "The Influence of Nitrogen Absorption on Microstructure, Properties and Cytotoxicity Assessment of 316L Stainless Steel Alloy Reinforced with Boron and Niobium," *Process. 2019, Vol. 7, Page 506*, vol. 7, no. 8, p. 506.
- [14] Hamidi MFA *et al.* "A review of biocompatible metal injection moulding process parameters for biomedical applications," *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.*, 2017; vol. 78, pp. 1263–1276.
- [15] Talha M., Behera CK, Sinha OP. "A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications," *Mater. Sci. Eng. C*, 2013; vol. 33, no. 7, pp. 3563–3575.
- [16] Molinari A, Kazior J, Marchetti F, Canteri R, Cristofolini I, Tiziani A. "Sintering Mechanisms of Boron Alloyed AISI 316L Stainless Steel," vol. 37, no. 2, pp. 115–122, Jan. 2013.
- [17] Molinari A, Kazior J, Straffelini G. "Investigation of liquid-phase sintering by image analysis," *Mater. Charact.*, 1995; vol. 34, no. 4, pp. 271–276.
- [18] Menapace C, Molinari A, Kazior J, Pieczonka T. "Surface self-densification in boron alloyed austenitic stainless steel and its effect on corrosion and impact resistance," vol. 50, no. 4, pp. 326–335, Dec. 2013.
- [19] Uzunsoy D. "Investigation of dry sliding wear properties of boron doped powder metallurgy 316L stainless steel," *Mater. Des.*, 2010; vol. 31, no. 8, pp. 3896–3900.
- [20] Gülsoy HÖ, "Production of injection moulded 316L stainless steels reinforced with TiC(N) particles," vol. 24, no. 12, pp. 1484–1491, Dec. 2013.
- [21] Ali S, Rani AMA, Altaf K, Baig Z. "Investigation of Boron addition and compaction pressure on the compactibility, densification and microhardness of 316L Stainless Steel," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2018; vol. 344, no. 1.
- [22] Choy MT, Tang CY, Chen , Wong CT, Tsui P. "In vitro and in vivo performance of bioactive Ti6Al4V/TiC/HA implants fabricated by a rapid microwave sintering technique," *Mater. Sci. Eng. C*, 2014; vol. 42, pp. 746–756.
- [23] Aslan N, Aksakal B. "Effect of graphene reinforcement on hybrid bioceramic coating deposited on the produced porous Ti64 alloys," *J. Porous Mater.*, 2021; vol. 28, no. 4, pp. 1301–1313.
- [24] Aslan N, Aksakal B, Findik F. "Fabrication of porous-Ti6Al4V alloy by using hot pressing technique and Mg space holder for hard-tissue biomedical applications," *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, 2021; vol. 32, no. 7, pp. 1–11.
- [25] Topuz M, Dikici B, Gavgalı M. "Challenges in the Production of Titanium-based Scaffolds Bio-functionalized with Hydroxyapatite by Powder Metallurgy Technique," *Avrupa Bilim ve Teknol. Derg.*, 2021; vol. 28, no. 28, pp. 46–51.
- [26] Sulima I, Jaworska L, Karwan-Baczewska J. "Effect of boron sinteraid on the microstructure and properties of austenitic stainless Steel TiB2 composites," *Arch. Metall. Mater.*, 2015; vol. 60, no. 4, pp. 2619–2624.
- [27] Lozada L, Castro F. "Controlled densification of boron-containing stainless steels," 2011.
- [28] Skałoń M, Kazior J. "Enhanced sintering of austenitic stainless steel powder aisi 316L through boron containig master alloy addition," *Arch. Metall. Mater.*, 2012; vol. 57, no. 3, pp. 789–797.

- [29] Tran BH, Tieu K, Wan S, Zhu H, Cui S, Wang L. "Understanding the tribological impacts of alkali element on lubrication of binary borate melt," *RSC Adv.*, 2018; vol. 8, no. 51, pp. 28847–28860.
- [30] Balci S, Sezgi NA, Eren E. "Boron Oxide Production Kinetics Using Boric Acid as Raw Material," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2012; vol. 51, no. 34, pp. 11091–11096.
- [31] Spadaro F, Rossi A, Lainé E, Hartley J, Spencer ND. "Mechanical and tribological properties of boron oxide and zinc borate glasses," *Phys. Chem. Glas. Eur. J. Glas. Sci. Technol. Part B*, 2016; vol. 57, no. 6, pp. 233–244.
- [32] Serafini FL *et al.* "Microstructure and mechanical behavior of 316L liquid phase sintered stainless steel with boron addition," *Mater. Charact.*, 2019; vol. 152, pp. 253–264.
- [33] Peruzzo M, Serafini FL, Ordoñez MF, Souza RM, Farias MCM. "Reciprocating sliding wear of the sintered 316L stainless steel with boron additions," *Wear*, 2019; vol. 422–423, pp. 108–118.
- [34] Dewidar MM, Khalil KA, Lim JK. "Processing and mechanical properties of porous 316L stainless steel for biomedical applications," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2007; vol. 17, no. 3, pp. 468–473.

## Tip-3 Bulanık Mantık ile Düşüş Kontrollü İnverter Tabanlı Mikro Şebekelerin İkincil Gerilim ve Frekans Restorasyon Kontrolü

Muhammed Serhat DÜZDAĞ<sup>1\*</sup>, Heybet KILIÇ<sup>2</sup>, Cem HAYDAROĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

<sup>2</sup> Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

<sup>3</sup> Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

\*<sup>1</sup> sduzdag@hotmail.com, <sup>2</sup> heybet.kilic @dicle.edu.tr, <sup>3</sup> cem.haydaroglu@dicle.edu.tr

(Geliş/Received: 09/11/2023;

Kabul/Accepted: 05/02/2024)

**Öz:** Geleneksel enerji kaynaklarının çevresel etkileri ve sürdürülebilirlik sorunları, enerji sektörünü bir takım değişimlere zorlamaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerji, giderek artan bir öneme sahiptir. Bu kaynaklar, çevre dostu ve sürdürülebilir enerji üretimi sağlayarak, geleneksel enerji kaynaklarının dezavantajlarını aşma potansiyeli taşımaktadır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılabilmesi için, enerji sektöründeki değişken dinamiklere odaklanmak gerekmektedir. Bu dinamikler arasında, geleneksel enerji kaynaklarının çevre dostu olmayan yapısı, enerji güvenliği ve çevresel düzen gibi konular bulunmaktadır. Bu noktada, mikro şebekeler devreye girmekte ve enerji üretimi, depolama ve tüketimi entegre eden bir yapı sunmaktadır. Mikro şebekeler, yerel enerji üretiminin artırılması ve enerji verimliliğinin artırılması gibi avantajlar sağlamakla birlikte, beraberinde bir takım dezavantajları da getirmektedir. Bu bağlamda, makale, mikro şebekelerin temel bir bileşeni olan gerilim ve frekans kontrolünü detaylı bir şekilde ele alarak, bu konunun mikro şebekelerin istikrarlı çalışması için kritik önemini vurgulamaktadır. Mikro şebekelerde gerilim ve frekans kontrolünün iyileştirilmesi için tip-3 bulanık kontrol (T3-BMK) yöntemi öne çıkmaktadır. T3-BMK, özellikle çok dağıtık üretim sahip mikro şebekelerde etkili bir kontrol yapısı sunarak paralel çalışma olanağı tanımaktadır. Bu makale, mikro şebekelerin enerji sektöründeki rolünü derinlemesine anlamak ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamak adına önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Tip-3 Bulanık Mantık Kontrol, Mikro Şebekeler, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Geleneksel Enerji Kaynakları, Gerilim ve Frekans Kontrolü

### Type-3 Fuzzy Based Secondary Voltage and Frequency Restoration Control of Inverter Based Microgrids with Droop Control

**Abstract:** The environmental impacts and sustainability problems of traditional energy sources force the energy sector to make some changes. In this context, renewable energy sources, especially energy obtained from natural sources such as solar, wind and hydroelectricity, are of increasing importance. These resources have the potential to overcome the disadvantages of traditional energy sources by providing environmentally friendly and sustainable energy production. However, in order to use renewable energy resources effectively, it is necessary to focus on the changing dynamics in the energy sector. These dynamics include issues such as the environmentally unfriendly nature of traditional energy sources, energy security and environmental order. At this point, microgrids come into play and offer a structure that integrates energy production, storage and consumption. Although microgrids provide advantages such as increasing local energy production and increasing energy efficiency, they also bring some disadvantages. In this context, the article discusses in detail voltage and frequency control, a fundamental component of microgrids, emphasizing the critical importance of this issue for the stable operation of microgrids. Type-3 fuzzy control (T3-FLC) method stands out for improving voltage and frequency control in microgrids. T3-FLC provides parallel operation by providing an effective control structure, especially in microgrids with highly distributed generation. This article stands out as an important resource to deeply understand the role of microgrids in the energy sector and contribute to sustainable energy production.

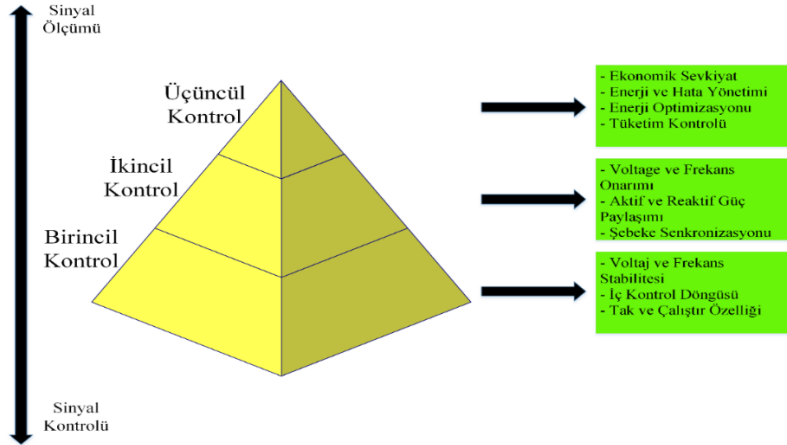
**Key words:** Type-3 Fuzzy Logic Control, Microgrids, Renewable Energy Sources, Conventional Energy Sources, Control of Voltage and Frequency

#### 1. Giriş

Günümüzde geleneksel enerji kaynakları yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak doğaya çok fazla sera gazı salması nedeniyle küresel ısınma ve daha birçok probleme neden olmaktadır. Son zamanlarda bu problemleri azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim ciddi oranda artış göstermektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları

\* Sorumlu yazar: [serhatduzdag@gmail.com](mailto:serhatduzdag@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0006-9892-3242, <sup>2</sup> 0000-0002-6119-0886, <sup>3</sup> 0000-0003-0830-5530

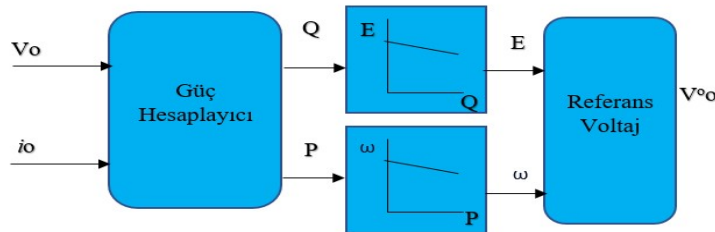
şebeye dahil olduktan sonra hayatımıza mikro şebeke kavramında girmeye başlamıştır [1]. Enerji üretimi ve dağıtımını için tek bir merkeze ihtiyaç duymaması mikro şebekenin ev büyük avantajlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikro şebekelerin en büyük dezavantajı olarak ta, yenilenebilir enerji kaynakları doğa şartlarına bağlı değişkenlik gösterebildiğinden mikro şebekelerde üretilen enerji değerlerinde sık bir şekilde dalgalanmalar meydana gelebilmekte ve bu dalgalanmaların giderilememesi durumunda enerji kesintileri baş gösterebilmesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Mikro şebekelerin bu tip dezavantajlarından dolayı mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol son derece önemlidir. Çünkü hiyerarşik kontrol sağlanırsa gerilim ve frekans kontrolü sağlanır ve enerji değerindeki dalgalanmalar giderilerek enerji sürekliliği sağlanır. Hiyerarşik kontrol üç basamaktan meydana gelmektedir. Bunlar primary (birincil) kontrol, secondary (ikincil) kontrol ve tertiary (üçüncül) kontrol basamaklarıdır [2]. Şekil 1’de Hiyerarşik kontrol katmanları gösterilmiştir.



Şekil 1. Hiyerarşik kontrol katmanları

### 1.1 Birincil kontrol

Birincil kontrol seviyesinin amacı, dağıtık enerji kaynaklarında önemli noktaların belirlenmesidir. Bu noktalar gerilim ve akım kontrol döngüleri için son derece önem arz etmektedir. İç kontrol döngülerinde sıfır noktası genel olarak referans olarak kabul edilir. Birincil seviye kontrolünün kullanıldığı alanlar PQ veya voltaj kontrol alanlarıdır. Birincil kontrol seviyesinin temel hedefleri, mikro şebekelerdeki gerilim ve frekans dengelemesini sağlamak, dağıtık enerji kaynakları (DEK) arasında kesintisiz iletişim aracılığıyla aktif ve reaktif güç paylaşımını gerçekleştirmek ve aşırı akım olaylarına müdahale ederek güç elektroniği cihazlarının sağlıklı çalışmasını temin etmektir. DEK'lerde, aktif ve reaktif güç paylaşımı PQ kontrol modunda önceden belirlenmiş referans değerlere dayanmaktadır. Gerilim kontrol modunda ise DEK, bir voltaj kontrolörü olarak işlev görmektedir. Bu görevi de birincil kontrolörün, referans geriliminin düşüş karakteristikleriyle belirlediği sınırlar içerisinde gerçekleştirmektedir [3]. Şekil 2’de voltaj kontrol modunda referans voltaj tayini gösterilmiştir.



Şekil 2. Voltaj kontrol modunda referans voltaj tayini[3]

Tablo-1’de birincil kontrol seviyesine ait hiyerarşik kontrol yöntemlerinin bir takım avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.



**Tablo1.** Birincil yöntemlerin avantajları ve dezavantajları

Kaynakça	Yıl	Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
[4]	2020	Düşüş Kontrol Teknikleri	-Uygulanabilirliği oldukça basit ve kolaydır. - Şebeke bağlı ya da şebekeden bağımsız çalışması mümkündür.	Gerilim ve frekansta sapsmalarla yol açar.
[5]	2023	V/f Kontrolü	Meydana gelebilecek frekans ve gerilim sapsmalarının önüne geçer.	Şebeke bağlı modda çalışması mümkün değildir.
[6]	2020	Açma-Kapama Kontrolü	Hızlı yanıt vermesine karşın oldukça düşük maliyetlidir.	Histerizis etkisine maruz kalabilir bu durumda dalgalanmalar meydana gelebilir.
[7]	2021	Faz Kilitli Döngü Kontrolü	Frekans kontrolünde son derece hassas bir yapıya sahiptir.	Yapısı oldukça karmaşıktır ve maliyeti oldukça fazladır.
[8]	2021	Empedans Kontrolü	Yükte meydana gelebilecek herhangi bir etkinin önüne geçilir ve stabilize devamı sağlanır.	İyi düzeyde ayarlama ve kalibrasyon durumu gerekebilir.
[9]	2020	Zaman Tabanlı Kontrol	Belli süre çerçevesinde sistemin hiçbir sapsma meydana gelmeden çalışmasını sağlar.	Bazı anlık dalgalanmalar meydana geldiğinde hassaslığı bu durumu algılamaya yetmeyebilir.
[10]	2021	Eşik Kontrolü	Anlık dalgalanmalara karşı hassasiyeti son derece yüksektir.	Eşik değeri çok büyük bir titizlikle doğru ayarlanmalıdır.

## 1.2 İkincil kontrol

Birincil kontrolde, frekans değerlerinde sapsmalar, kontrol sabit durumda olsa bile meydana gelme ihtimali yüksektir [11]. Merkezi kontrol içerisinde ikincil kontrol son derece önemli bir rol üstlenmektedir. Sapsma meydana geldiği zaman frekans ve gerilim değerini yeniden yükler ve birincil kontrol nedeniyle meydana gelen dalgalanmaları giderebilir. Bu kontrol hiyerarşisi, birincil kontrol hiyerarşisinden daha yavaş dinamik tepkiye sahiptir. Bir mikro şebekenin açılma frekansının referans değeri  $\omega_{ref}$  ve terminal gerilim değerinin referans değeri  $E_{ref}$  şeklindedir. Bu mikro şebekede ortaya çıkan hata sinyalleri sırasıyla  $X_{\omega}$  ve  $X_E$  şeklindedir. Ortaya çıkan bu hatalar birincil kontrolöre gönderilerek giderilir [12]. Denklem 1 ve Denklem 2'de meydana gelen bu hata sapsmalarının eşitlikleri verilmiştir.

$$X_{\omega} = L_{P\omega}(\omega_{ref} - \omega) + L_{I\omega} \int (\omega_{ref} - \omega) dt + \Delta \omega_s \quad (1)$$

$$X_E = L_{PE}(Y_{ref} - Y) + L_{IE} \int (Y_{ref} - Y) dt \quad (2)$$

Tablo 2'de ikincil kontrol seviyesine ait hiyerarşik kontrol yöntemlerinin bir takım avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

**Tablo 2.** İkincil yöntemlerin avantajları ve dezavantajları

Kaynakça	Yıl	Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
[13]	2021	Aktif-Reaktif Güç Kontrolü	Meydana gelebilecek frekans ve gerilim sapmalarının önüne geçer.	Aktif ve reaktif güç açısından paylaşım mümkün değildir.
[14]	2020	Orantılı İntegral Kontrolü	İstenen gerilim ve frekans değerlerine çok yakın bir değer mümkün kılar.	Sistem parametreleri sürekli ayarlanmalıdır.
[15]	2020	Orantılı İntegral-Türev Kontrolü	Sistem dinamiğini en iyi modda tutar.	Bu yöntemde oran integral kontrolünün dezavantajları mevcuttur.
[16]	2021	Geri Bildirim Kontrolü	Geri bildirim özelliği aracılığıyla meydana gelen tüm sapmaları tespit eder ve sapmalar giderilir.	Geri bildirim mekanizmaların ayarlarında en ufak bir kusur dahi bulunmamalıdır.
[17]	2022	Merkezi Kontrol	Tek bir merkez tarafında kaynaklar yönetilir.	Tek bir merkeze bağlı olduğundan merkezdeki sorun sistemi etkiler.
[18]	2021	Merkezi Olmayan Kontrol	Tek bir merkez bulunmaz. Yani sistem elemanları bağımsız çalışır.	Elemanlar bağımsız çalıştığı için sistem bileşenleri arasındaki uyum oldukça güçtür.

### 1.3 Üçüncül kontrol

Üçüncül kontrol tekniği, elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiği durumlarda yaygın olarak kullanılır ve her türlü talebi karşılayabilecek güçtedir. Bu tür durumlarda iki yöntemin kullanılması söz konusu olabilir. Bunların ilki, fazla gücün yüksek ataletli bir doğru akım (DA) sistemine gönderilmesidir, diğer bir yöntem ise fazla miktardaki gücün invertör sayesinde alternatif akım (AA) şebekesine gönderilmesidir [19]. Mikro şebekelerde güç, gerekli talep seviyesinin altında bir seviyede üretilirse eksik kalan miktar yüksek ataletli bir DA sistem veya AA sistem tarafından karşılanır. Üçüncül kontrolün seviyesinin temel amacı mikro şebekede o an bulunan frekans değerini en uygun değere olabildiğince yaklaştırma görevini üstlenir. Bunu da iki güç şebekesi arasındaki güç değerinin referans değerle kıyaslamasını yaparak gerçekleştirir. Üçüncül kontrol, mikro şebekenin en ideal düzeyde çalışmasını sağlamak amacıyla gereken ekonomik kriterleri göz önünde bulundurur. Aynı zamanda mikro şebeke ile ana şebeke arasındaki güç sirkülasyonunu sağlar. Aşağıdaki eşitliklerde sırasıyla açılal frekans değerinin referans değeri ve voltaj frekans değerlerinin denklemleri verilmiştir. Bu denklemlerin çözümlenmesi için ilk olarak aktif ve reaktif çıktı güçler ( $C_T$  ve  $D_T$ ) ölçülür. Sonrasında bu değerler, referans değerler ( $(C_T)^{ref}$  ve  $(D_T)^{ref}$ ) esasları çerçevesinde açılal frekans değeri ve voltaj değerini elde etmek amacıyla kullanılır. Bu değerler  $\omega^{ref}$  ve  $N^{ref}$  ile sembolize edilir [20]. Denklem 3 ve Denklem 4'te sırasıyla bu değerlerin eşitlikleri verilmiştir.

$$\omega^{ref} = K_{CC} ((C_T)^{ref} - C_T) + K_{IC} \int ((C_T)^{ref} - C_T) dt \quad (3)$$

$$N^{ref} = K_{CD} ((D_T)^{ref} - D_T) + K_{ID} \int ((D_T)^{ref} - D_T) dt \quad (4)$$

Tablo 3'de üçüncül kontrol seviyesine ait hiyerarşik kontrol yöntemlerinin bir takım avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir.

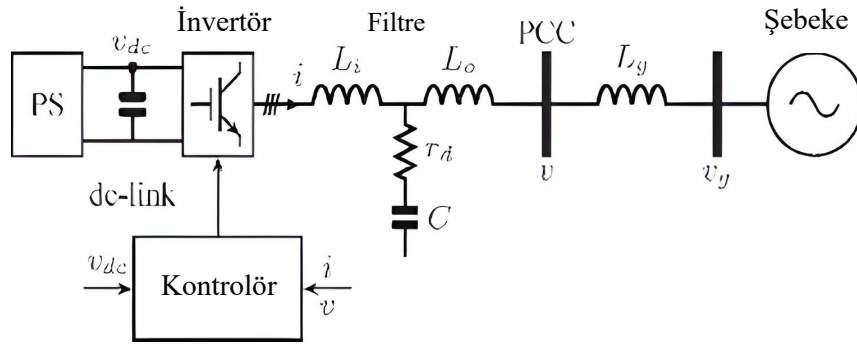
**Tablo 3.** Üçüncül yöntemlerin avantajları ve dezavantajları

Kaynakça	Yıl	Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
[21]	2021	Yapay Sinir Ağları	Sistem performansına katkıda bulunmasının yanı sıra karmaşık sistemleri modelleme konusunda da katkı sağlar.	Hesaplaması maliyetli olabilir
[22]	2022	Genetik Algoritmalar	Sistemde var olan sınırlara göre işlevini gerçekleştirir.	Yakınsama olayı erken gerçekleşebilir.
[23]	2020	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Sistem performansını en ideal kıvama getirebilir.	Denetleyicinin tasarımında zorluklar yaşanabilir.
[24]	2021	Karınca kolonisi optimizasyonu	Kullanım esnekliği sunmasının yanı sıra kompleks sorunları çözme konusunda da yeteneklidir.	Kompleks problemler için parametre belirlemek oldukça zordur.
[25]	2021	Yapay Bağışıklık Sistemi	Birçok parametre ve probleme karşı adapte olma özelliği sayesinde birçok probleme çözüm bulabilir.	Yapısı gereği modellemesi oldukça zordur.
[26]	2023	Yapay Arı Kolonisi Algoritması	Optimum fonksiyonuna bağlı bir şekilde çeşitli problemler için kullanılabilir.	Mekanizmasının yapısı nedeniyle kesin bir çözüm sunamaz.
[27]	2023	Diferansiyel Evrim	Algoritmasının güçlü olması nedeniyle uygulanabilirliği yüksektir. Aynı zamanda parametrelerin düzenlenmesi son derece kolaydır.	Değişik ve zorlu problemlerde çalışma hızı oldukça düşük olabilmektedir.

Bu makalede önerilen yöntem T3-BMK tabanlı gerilim ve frekans kontrolü yöntemidir. Geleneksel tip-1 bulanık mantık kontrol sistemleri, belirli bir çıkışa karşılık gelen kesin kurallar içermekte ve bu kurallar genellikle belirli çalışma koşullarına dayanmaktadır. Tip-2 bulanık mantık kontrolü, daha karmaşık koşulları ele alabilir, ancak T3-BMK, sistem içindeki belirsizlik seviyelerini daha geniş bir perspektiften ele alarak, mikro şebeke sistemlerindeki gerilim ve frekans kontrolü için daha yüksek bir derecede esneklik sağlar. T3-BMK, mikro şebeke sistemlerindeki dinamik ve ani değişikliklere hızlı bir şekilde uyum sağlayabilir. Bu makalede düşüş kontrollü inverter tabanlı mikro şebekelerin tip-3 bulanık tabanlı ikincil gerilim ve frekans restorasyon kontrolü yapılmıştır. Bunun için öncelikle İki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu ve Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı sistem Matlab/Simulink modellenmiştir. T3-BMK ile farklı durumlar için gerilim ve frekans kontrolü yapılmıştır [28].

## 2. Mikro Şebekeler

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarının popüler hale gelmesiyle birlikte mikro şebekelerde gün geçtikçe önem kazanmaya başlamıştır. Bu makalede, gerilim ve frekans kontrolünü sağlamak amacıyla T3-BMK yöntemi üzerinde duracağız. P-Q kontrolü gerilim ve frekans kontrolü yöntemlerinin geleneksel kontrol yöntemleri arasındadır. T3-BMK yaklaşımıyla P-Q kontrol yönteminin hassasiyetinin daha da artırılması amaçlanmaktadır. Matlab/Simulinkte oluşturulan iki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu, tek dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu, tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebekenin, P-Q kontrolünde aktif güç (P), reaktif güç (Q), faz açısı (ph), frekans (f) ve farklı fazlardaki gerilim değerlerinin nasıl değişiklik gösterdiğini derinlemesine analiz edeceğiz. Bu değişiklikleri dört farklı durumda inceleyeceğiz. Şekil 3'te yöntemi test etmek amacıyla kullanılan devre verilmiştir [29].



Şekil 3. Kontrol devresi

### 3. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolör Yapısı

Günümüzde geleneksel enerji kaynaklarının doğaya saldıkları sera gazı nedeniyle çevresel kirlilik ciddi derecede ilerleme kaydetmiştir. Çevre kirliliği ve küresel ısınma kaynaklı sorunları gidermek amacıyla karbon emisyonunu azaltmak için yenilenebilir enerji kaynakları tek çözüm haline gelmiştir [30]. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı arttıkça mikro şebekelerde popüler hale gelmeye başlamıştır. Geleneksel enerji kaynaklarının çabuk tükenmesine karşın yenilenebilir enerji kaynakları uzun vadeli kullanılabilirdiği için enerji sürekliliği sağlanır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğal olduğu için doğa şartlarına bağlı olarak sık sık değişimler meydana gelmektedir. Bu durum neticesinde mikro şebekelerde üretilen enerji değerlerinde sık bir şekilde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Meydana gelen dalgalanmalar elektrik enerjisinde sağlıklı olmayan bir durum teşkil etmektedir. Bu nedenle mikro şebekelerde gerilim-frekans kontrolü son derece önemlidir. Bu kontrolü sağlamak amacıyla literatürde çalışılan yöntemlerden bazıları bulanık mantık yöntemine dayalı yöntemlerdir. Bulanık mantık 1965 yılında Lotfi Zadeh tarafından ortaya atılan bir kontrol yöntemidir. Aynı zaman Japon matematikçi ve mühendis olan Zadeh tarafından geliştirilip “Fuzzy Sets” makalesinde bu yöntem değinmiştir. Bu yöntemi çıkarmasındaki temel sebep aşırı derece karmaşık gerilim-frekans dalgalanmalarına karşın bulanık mantık yöntemleriyle soruna yapay zeka bakış açısıyla bir yaklaşım sunmuştur [31].

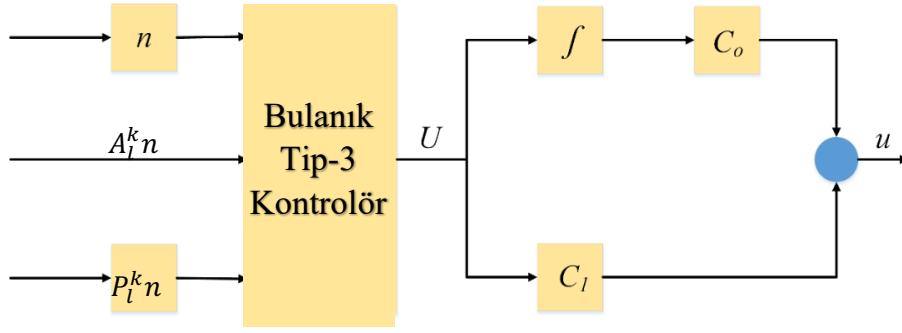
Genel olarak bulanık mantık yöntemine dayalı tüm yöntemlerde önemli olan kriter giriş değerlerinin doğru ve sağlıklı bir şekilde ayarlanmış olmasıdır. Yani diğer bir deyişle gerilim ve frekansın önceki değerlerinin net bir şekilde belirlenmesi gerekir. Çünkü dalgalanma meydana geldiği zaman sistem önceki değerleri hafızasına kaydederek müdahalede bulunabilir. Bulanık mantık yöntemine dayalı yöntemlerin en temel aşamalarından biri kümeleme yöntemidir [32].

Tip-1 bulanık mantık kontrolü (T1-BMK) ve tip-2 bulanık mantık kontrolüne (T2-BMK) dayalı yöntemler bu yöntemler arasında kullanılan en popüler yöntemlerdir. Ancak bu makalemizde kullanacağımız T2-BMK dayalı yöntem bu iki yöntemin daha geliştirilmiş versiyonudur [33]. T3-BMK yöntemi daha da geliştirilerek üyelik fonksiyonları daha yüksek mertebeli hale getirilip çözülmesi en zor karmaşık problemleri rahatlıkla çözebilecek hale getirilmiştir. Yapılan birçok testten başarıyla geçen bu yöntem T1-BMK ve T2-BMK yönteminin çözemediği birçok problemi çözme konusunda son derece başarılı olmuştur. Karmaşık ve doğrusal olmayan birçok sorunun üstesinden oldukça rahat bir şekilde gelmeyi başarmıştır [34].

Bu yöntemi daha detaylı bir şekilde analiz etmek amacıyla yöntem içerisinde bulunan eşitliklere göz atacağız. Bu eşitliklerde  $n$ , kontrol edilen parametrenin hatası ve  $A_l^k n$  ve  $P_l^k n$  ise bu hata üzerine yapılan işlemlerdir.  $X$  değişkeni, farklı bölümlerde meydana gelen hata değerleridir [35]. Şekil 4’te bulanık tip-3 kontrolün blok diyagramı gösterilmiştir. Denklem 5 ve Denklem 6’da ise giriş değerinin hata değerleri verilmiştir.

$$A_l^k n(l) = \frac{\int_0^l n(x)(l-x)^{-k} dx}{\gamma(1-k)} \quad (5)$$

$$P_l^k n(l) = \frac{\int_0^l n(x)(l-x)^{k-1} dx}{\gamma(k)} \quad (6)$$



Şekil 4. Bulanık tip-3 kontrol blok diyagramı

$\tilde{T}_n^1 - \tilde{T}_n^2$ ,  $T_{P_l^k n}^1 - \tilde{T}_{P_l^k n}^2$  ve  $T_{A_l^k n}^1 - \tilde{T}_{A_l^k n}^2$  üyelik fonksiyonları,  $n$ ,  $A_l^k n$  ve  $P_l^k n$  giriş değerleri için referans olarak görülebilir. Aşağıdaki denklemlerde üyelik fonksiyonlarının daha iyi çözümlenebilmesi adına fonksiyonlar belli bölümlere ayrılmıştır. Devrelerde kullanılan sensörlerde hatalar veya ufak sapmalar meydana gelebilir. Denklem 7, Denklem 8, Denklem 9 ve Denklem 10'da bu hatalar ve  $\beta_h$  değeri, ayrılan her bir bölüm için hesaplanmıştır:

$$\bar{t}_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\bar{n}\bar{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2}\right), \quad (7)$$

$$\bar{t}_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\bar{n}\underline{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2}\right), \quad (8)$$

$$\underline{t}_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\underline{n}\bar{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2}\right), \quad (9)$$

$$\underline{t}_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h} = \exp\left(-\frac{(\underline{n}\underline{\beta}_h - c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h})^2}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2}\right), \quad (10)$$

Sisteme giren  $n$  hata değerlerini gidermek için Denklem 11, Denklem 12, Denklem 13 ve Denklem 14'deki sadeleştirme işlemlerinin yapılı:

$$\bar{t}_{\bar{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (11)$$

$$\bar{t}_{\underline{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (12)$$

$$\underline{t}_{\bar{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (13)$$

$$\underline{t}_{\underline{\beta}_h} = \frac{n\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2 c_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}}{\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \underline{\beta}_h}^2 + \sigma_s^2}, \quad (14)$$

$h$  ve  $m$  değerleri merkez değerlerdir ve bu merkezi değerler  $\bar{\vartheta}_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}$ ,  $\vartheta_{\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h}$  değerleri için standart değerlerdir.  $\tilde{T}_n^m | \bar{\beta}_h$  değeri sistemdeki üyelik fonksiyonudur. Denklem 15, Denklem 16, Denklem 17 ve Denklem 18'de girdi değeri  $P_l^k n$ 'dir.

$$\bar{t}_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h}\right), \quad (15)$$

$$\bar{t}_{P_l^k n}^m |\underline{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \bar{n}_{\underline{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h}\right), \quad (16)$$

$$\underline{t}_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h}\right), \quad (17)$$

$$\underline{t}_{P_l^k n}^m |\underline{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(P_l^k \underline{n}_{\underline{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h}\right), \quad (18)$$

$P_l^k n$  girdisinin n hata değeri üzerinde işlem yapabilmesi için  $P_l^k n$  değerlerinin Denklem 19, Denklem 20, Denklem 21 ve Denklem 22’deki gibi daha sade bir hale getirilmelidir.

$$P_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (19)$$

$$P_l^k \bar{n}_{\underline{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (20)$$

$$P_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (21)$$

$$P_l^k \underline{n}_{\underline{\beta}_h} = \frac{P_l^k n \vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (22)$$

$\vartheta_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h$  ve  $\vartheta_{P_l^k n}^m |\underline{\beta}_h$  üyelik fonksiyonunun standart değerleri ve h ve m değerleri merkezi değerlerdir.  $\tilde{T}_{P_l^k n}^m |\bar{\beta}_h$  değeri ise sistemdeki üyelik fonksiyonudur. Girdi değeri  $A_l^k n$  için Denklem 23, Denklem 24, Denklem 25 ve Denklem 26’da verilmiştir.

$$\bar{t}_{A_l^k n}^m |\bar{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(A_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\bar{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\bar{\beta}_h}\right), \quad (23)$$

$$\bar{t}_{A_l^k n}^m |\underline{\beta}_h = \exp\left(-\frac{\left(A_l^k \bar{n}_{\underline{\beta}_h} - c_{T_l^k n}^m |\underline{\beta}_h\right)^2}{\vartheta_{T_l^k n}^2 |\underline{\beta}_h}\right), \quad (24)$$

$$\underline{t}_{A_l^k n}^m | \bar{\beta}_h = \exp \left( - \frac{\left( A_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} - c_{T_{A_l^k n}^m} | \bar{\beta}_h \right)^2}{\vartheta_{T_{A_l^k n}^m}^2 | \bar{\beta}_h} \right), \quad (25)$$

$$\underline{t}_{A_l^k n}^m | \beta_h = \exp \left( - \frac{\left( A_l^k \underline{n}_{\beta_h} - c_{T_{A_l^k n}^m} | \beta_h \right)^2}{\vartheta_{T_{A_l^k n}^m}^2 | \beta_h} \right), \quad (26)$$

$A_l^k n$  girdisinin n hata değeri üzerinde işlem yapabilmesi için  $P_l^k n$  değerlerinin Denklem 27, Denklem 28, Denklem 29 ve Denklem 30'daki gibi daha sade bir hale getirilmesidir.

$$A_l^k \bar{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{A_l^k n \bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \bar{\beta}_h}{\bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (27)$$

$$A_l^k \bar{n}_{\beta_h} = \frac{A_l^k n \bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \beta_h}{\bar{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2}, \quad (28)$$

$$A_l^k \underline{n}_{\bar{\beta}_h} = \frac{A_l^k n \underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \bar{\beta}_h}{\underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \bar{\beta}_h + \sigma_s^2}, \quad (29)$$

$$A_l^k \underline{n}_{\beta_h} = \frac{A_l^k n \underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2 c_{T_n^m} | \beta_h}{\underline{\vartheta}_{T_n^m}^2 | \beta_h + \sigma_s^2}, \quad (30)$$

$\bar{\vartheta}_{T_{A_l^k n}^m} | \bar{\beta}_h$  ve  $\underline{\vartheta}_{T_{A_l^k n}^m} | \bar{\beta}_h$  üyelik fonksiyonunun standart değerleri ve h ve m değerleri merkezi değerlerdir.  $\bar{T}_{A_l^k n}^m | \bar{\beta}_h$  değeri sistemin üyelik fonksiyonudur.  $\bar{\beta}_h$  değeri için:

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^1 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \quad (31)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^2 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \quad (32)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^3 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \quad (33)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^4 = \bar{t}_{T_n^1 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \quad (34)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^5 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \quad (35)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^6 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \quad (36)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^7 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^1 | \bar{\beta}_h \quad (37)$$

$$\bar{Z}_{\bar{\beta}_h}^8 = \bar{t}_{T_n^2 | \bar{\beta}_h} \bar{t}_{P_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \bar{t}_{A_l^k n}^2 | \bar{\beta}_h \quad (38)$$

$\underline{\beta}$  değeri için:

$$\underline{Z}_{\underline{\beta}_h}^1 = \underline{t}_{T_n^1 | \underline{\beta}_h} \underline{t}_{P_l^k n}^1 | \underline{\beta}_h \underline{t}_{A_l^k n}^1 | \underline{\beta}_h \quad (39)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^2 = \bar{t}_{T_n^1|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (40)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^3 = \bar{t}_{T_n^1|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (41)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^4 = \bar{t}_{T_n^1|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (42)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^5 = \bar{t}_{T_n^1|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (43)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^6 = \bar{t}_{T_n^2|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (44)$$

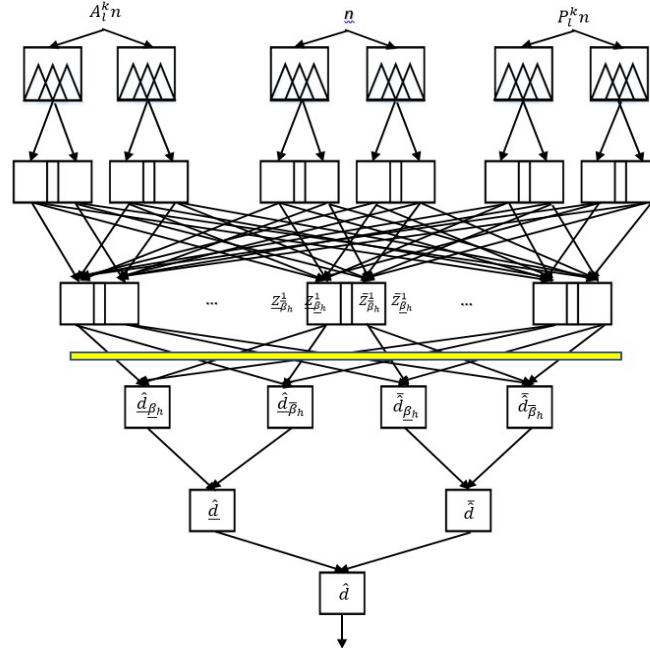
$$\bar{Z}_{\beta_h}^7 = \bar{t}_{T_n^2|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (45)$$

$$\bar{Z}_{\beta_h}^8 = \bar{t}_{T_n^2|\beta_h} \bar{t}_{P_n^k|\beta_h} \bar{t}_{A_n^k|\beta_h} \quad (46)$$

Z değerleri, sadeleştirme işlemleri sonucunda elde edilen değerlerin sonuca ulaştırılması için kullanılan bir fonksiyondur.  $P_n^k$  ve  $A_n^k$  fonksiyonları Z türünden elde edilir. Böylelikle hata giderilir ve sonuç elde edilir [36]. Elde edilen  $\bar{Z}$  ve  $\underline{Z}$  değerleriyle yapılan sadeleştirme işlemleri sonucunda  $\hat{d}$  çıkış sinyali Denklem 47’de verilmiştir:

$$\hat{d} = \frac{\bar{d} + \underline{d}}{2} \quad (47)$$

Şekil 5’de  $\hat{d}$  üyelik fonksiyonunun gösterilmiştir.



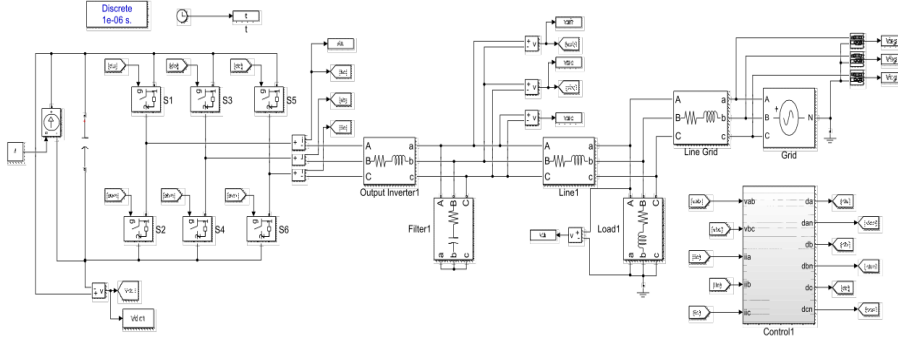
Şekil 5. Üyelik fonksiyonlarının şeması [37].

#### 4. Bulgular ve Sonuç

##### 4.1 Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke P= 6 kW, Q= 0 kVAR

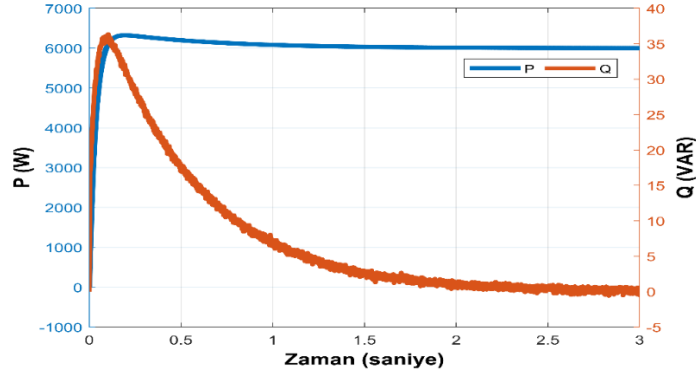
Bu durumda yükün doğa şartlarına karşı nasıl değişkenlik göstereceğini inceleyeceğiz. Şekil 6’da tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebekenin simülank modeli verilmiştir.





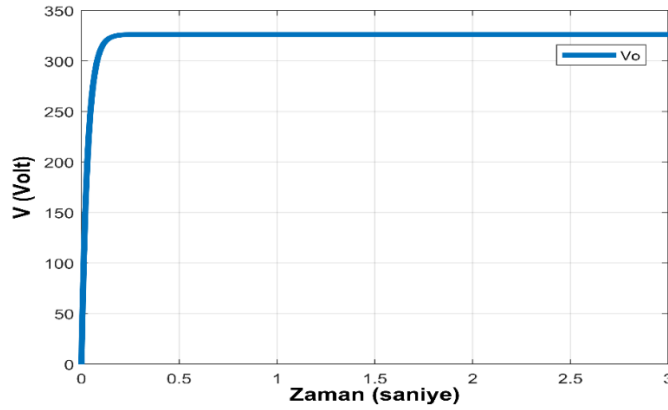
Şekil 6. Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebekenin simulink modeli

Şekil 7’de aktif ve reaktif gücün zaman göre değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere 0 – 0,2 saniye aralığında aktif güç ritmik bir şekilde yükseliş rotası izlemektedir. Ardından 0,2 saniyeden itibaren T3-BMK sayesinde ideal değerde sabit rota seyretmektedir. Ancak reaktif gücü sıfır olarak aldığımız için Q değeri 0 – 0,2 aralığında keskin bir artış gösterdikten sonra aynı şekilde keskin bir azalış göstererek 0,2 – 3 aralığında 0 (sıfır) kVar seviyesine düşüş göstermiştir.



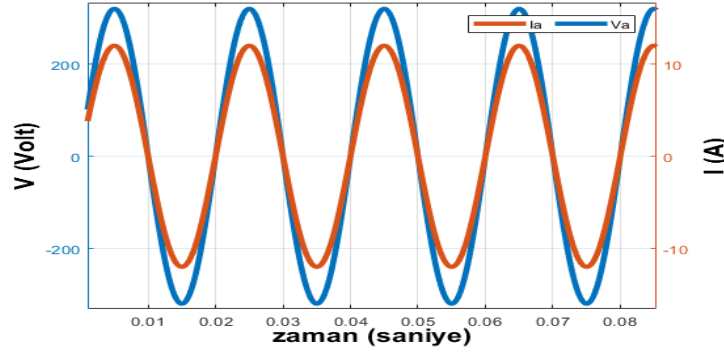
Şekil 7. Aktif ve reaktif güç değişimi

Şekil 8’de T3-BMK sayesinde 0 – 0,2 aralığında hızlı bir şekilde nominal gerilime ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 8. Çıkış geriliminin değişimi

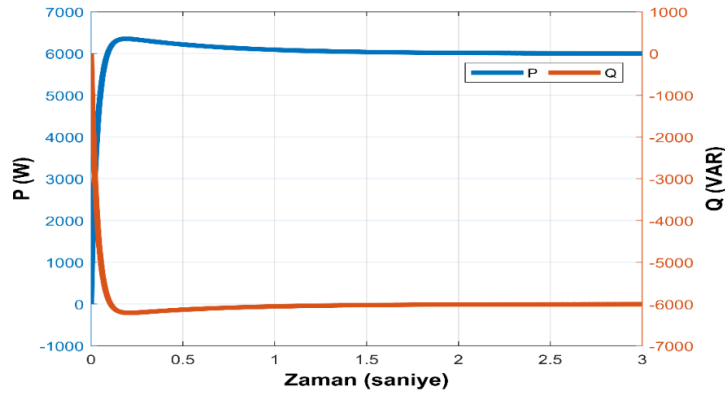
Şekil 9’da ise akım ve gerilim değerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Grafikte akım değeri yaklaşık olarak her 20 milisaniyede bir -12A ile 12A aralığında değer almaktadır. Ancak akım değeri gerilime göre çok düşük kaldığından daha görünür olması adına belli oranda genişletildi. Gerilimde aynı şekilde 20 milisaniyede bir yaklaşık -320 ile 320V aralığında değer almaktadır.



Şekil 9. Akım ve gerilimin değişimi

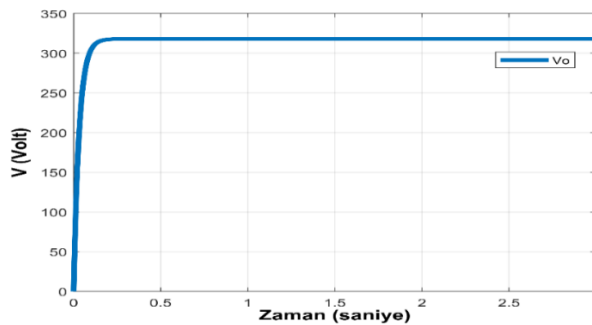
#### 4.2 Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke $P=6\text{ kW}$ , $Q=-6\text{ kVAR}$

Bu durumda yükün aktif gücü  $6\text{ kW}$  ve reaktif gücü  $-6\text{ kVAR}$  olarak ele alacağız. Şekil 10'da görüldüğü üzere  $0 - 0,2$  saniye aralığında aktif güç ritmik bir şekilde yükseliş rotası izlemektedir. Reaktif güç ise aktif gücün tersi yönünde rota izlemektedir. Bunun nedeni reaktif gücü  $-6\text{ kVAR}$  aldığımız için başlangıçtan itibaren  $-6\text{ kVAR}$  değerine ulaşma eğiliminden kaynaklıdır. Aktif güç  $0,2 - 3$  saniye aralığında T3-BMK sayesinde yavaşça azalış rotası izleyerek  $6\text{ kW}$  değerinde sabitlenmektedir. Reaktif güç ise yine aktif gücün tersi yönünde bir rota izleyerek  $-6\text{ kVAR}$  değerinde sabitlenmektedir.



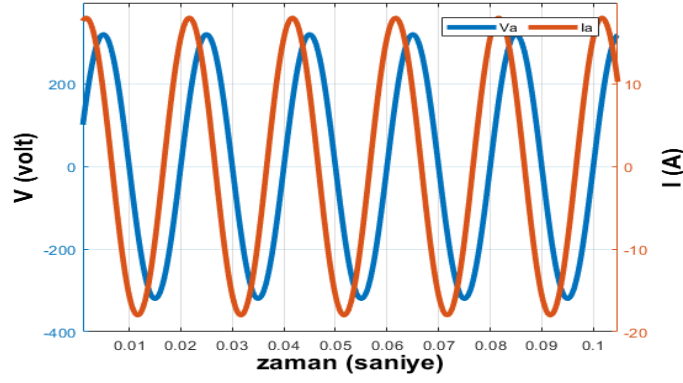
Şekil 10. Aktif ve reaktif güç

Şekil 11'de T3-BMK sayesinde  $0 - 0,2$  Vo gerilimine hızlıca ulaşmaktadır.



Şekil 11. Çıkış geriliminin değişimi

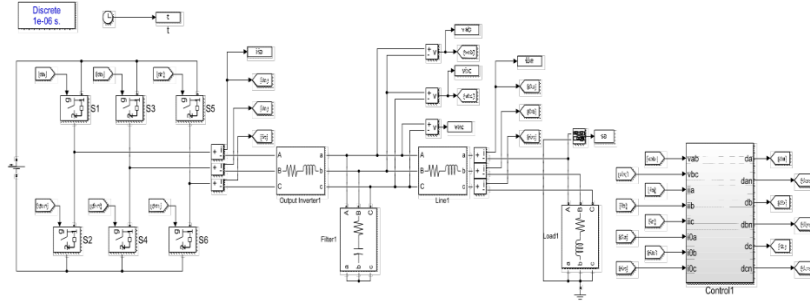
Şekil 12'de ise akım ve gerilim değerinin zaman göre değişimi gösterilmiştir ve akım değeri yaklaşık olarak her 20 milisaniyede bir  $-280$  ile  $280\text{A}$  aralığında değer almaktadır. Ancak akım değeri gerilime göre çok düşük kaldığından daha görünür olması adına belli oranda genişletildi. Gerilimde aynı şekilde  $0,7$  milisaniyede bir yaklaşık  $-380$  ile  $380\text{V}$  aralığında değer almaktadır.



Şekil 12. Akım ve gerilimin değişimi

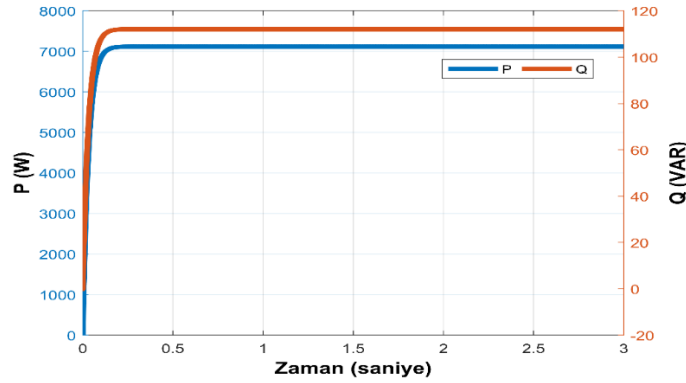
#### 4.3 Tek dağıtık üretic ve yükün bulunduğu ada modu durumu

Bu durumda  $P = 7 \text{ kW}$  ve  $Q=110 \text{ kVAR}$  olarak alınmıştır ve tek dağıtık üreticinin ve yükün doğa şartlarına karşı nasıl değişkenlik göstereceğini inceleyeceğiz. Şekil 13'te tek dağıtık üreticili ve ada modunda mikro şebekenin simulink modeli verilmiştir.



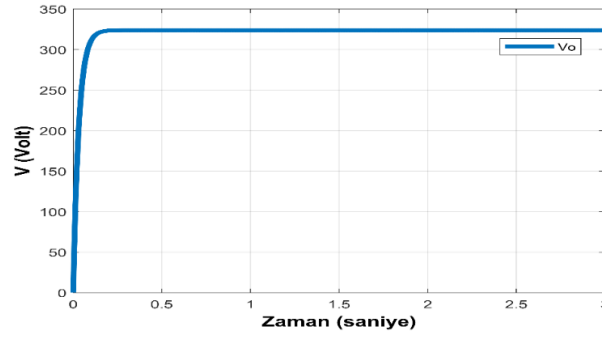
Şekil 13. Tek dağıtık üreticili ada modunda mikro şebekenin simulink modeli

Şekil 14'te aktif ve reaktif gücün zaman göre değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde şebekeden bağımsız olan ada mod durumunda 0 – 0,2 saniye aralığında T3-BMK sayesinde yükün ihtiyacı olan P ve Q hızlıca ulaşılmıştır.



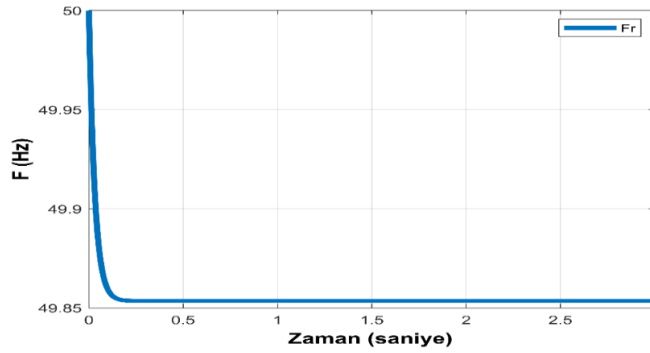
Şekil 14. Aktif ve reaktif güç değişimi

Şekil 15'te ise 0 – 0,2 aralığında  $V_o$  değerine çok hızlı ulaşıldığı ve sistem geriliminin sabit kaldığı görülmüştür.



Şekil 15. Çıkış geriliminin değişimi

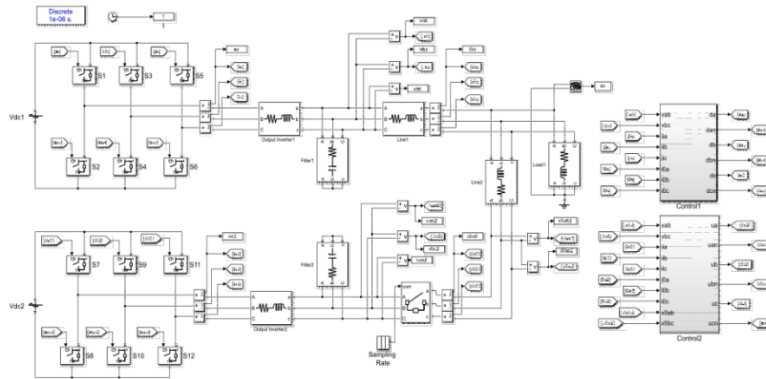
Şekil 16'da ise sistemin frekans değerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Frekans değerinde hiç sapma olmaması veya çok küçük ölçekte sapma meydana gelmesi sistemin son derece sağlıklı bir şekilde çalıştığını gösterir. Aynı şekilde ufak sapmaların meydana gelmesi sistemin gerilim ve frekans kontrolünün başarılı bir şekilde sağlandığını gösterir. 0 – 0,2 aralığında sistemin frekans değeri 0,14 Hz değer kaybederek 50 Hz değerinden 49,86 Hz değerine gerilemiştir. T3-BMK sayesinde meydana gelen sapmalar minimize edilmiştir.



Şekil 16. İkinci durumda frekansın değişimi

#### 4.4 İki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu

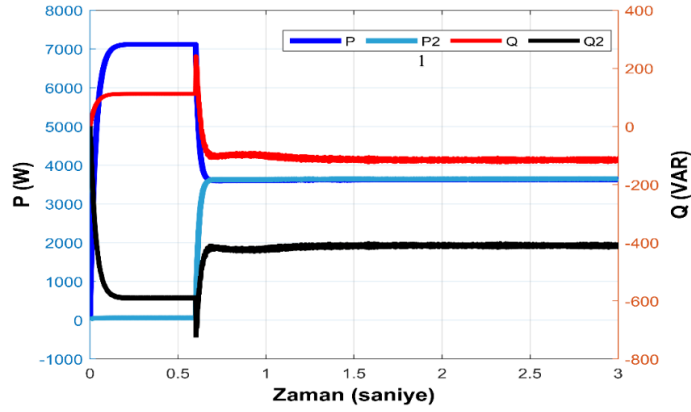
Bu durumda yükün  $P = 7kW$   $Q = 110 Kvar$  durumu için hem birincil hem de ikincil kontrol durumu inceleyeceğiz. Şekil 17'de iki dağıtık üreteçli ada modu durumunda mikro şebekenin simulink modeli verilmiştir.



Şekil 17. İki dağıtık üreteçli ada modunda mikro şebekenin simulink modeli

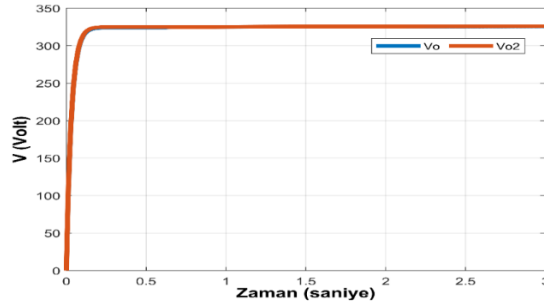
Şekil 18'de aktif ve reaktif gücün zaman göre değişimi verilmiştir. Aynı güç değerlerinde iki dağıtık üreteç ve sabit bir yükün hem birincil hem de ikincil kontrolünün sistemin çalışma esnasında dengeye gelmesi durumu verilmiştir. Birinci üreticinin aktif güç ( $P1$ ) ile İkinci üreticinin aktif gücü ( $P2$ ) 0,5 sn gibi kısa sürede sisteme dengeye gelmiş aktif güçler ortak paylaşılmıştır. Ancak Birinci üreticinin reaktif güç ( $Q1$ ) ile ikinci üreticinin reaktif gücü

(Q2) 0,5 sn yükün reaktif gücünü ortak olarak paylaşım yapılmıştır. Sistem dengesine yaklaşık birazcık daha geç ulaşmıştır.



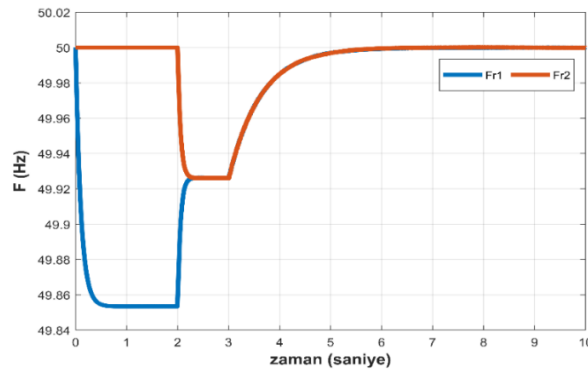
Şekil 18. İlk durumda aktif ve reaktif güç

Şekil 19'da ise T3-BMK yöntemi sayesinde  $V_o$  ve  $V_{o2}$  değişmeden hızlıca aynı görüneyi takip ettiği görülmüştür.



Şekil 19.  $V_o$  ve  $V_{o2}$  gerilimleri

Bu dağıtık üreteçlerde frekans değerleri de mevcuttur ve bunlarında kontrolünü sağlamak dağıtık üreteçler açısından son derece önemlidir. Şekil 20'de bu iki dağıtım şebekesine ait frekans değerlerinin zamana göre değişimi gösterilmiştir. T3-BMK aracılığıyla çok hızlı bir şekilde sistem frekansına ulaşmıştır.



Şekil 20. İki dağıtık üreticinin frekans değişimi

## 5. Sonuçlar

Bu makalede düşüş kontrollü inverter tabanlı mikro şebekelerin tip-3 bulanık tabanlı ikincil gerilim ve frekans restorasyon kontrolü yapılmıştır. Bu önerilen T3-BMK kontrol yöntemi İki dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu, Tek dağıtık üreteç ve yükün bulunduğu ada modu durumu, Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke  $P=6$  kW,  $Q=-6$  kVAR ve Tek dağıtık üreteçli şebekeye bağlı mikro şebeke  $P=6$  kW,  $Q=0$  kVAR

dört ayrı modelde test edilmiştir. Bu dört ayrı durumda aktif ve reaktif güce ulaşma, şebeke gerilimi ulaşma ve şebeke frekansını yakalaması incelenmiştir. Bu makalede T3-BMK kontrol ile ikincil kontrol durumunda çok hızlı ve stabil bir şekilde sistem nominal çalışma şartlarına ulaştığı görülmüştür.

### Kaynaklar

- [1] Kilic, H. "Distributed cooperative fault tolerant optimal active power control in AC microgrid." *ISA transactions* 142 (2023): 98-111.
- [2] Vandoorn, TL, Vasquez JC, De Kooning J, Guerrero, JM, Vandevelde L. (2013). Microgrids: Hierarchical control and an overview of the control and reserve management strategies. *IEEE industrial electronics magazine*, 7(4), 42-55.
- [3] Abhishek, A, Ranjan A, Devassy S, Kumar Verma B, Ram SK, Dhakar AK. (2020). Review of hierarchical control strategies for DC microgrid. *IET Renewable Power Generation*, 14(10), 1631-1640.
- [4] Bhatt N, Sondhi Arora, S. (2022). Droop control strategies for microgrid: A review. *Advances in Renewable Energy and Electric Vehicles: Select Proceedings of AREEV 2020*, 149-162.
- [5] Ghasemi N, Ghanbari M, Ebrahimi R. (2023). Intelligent and optimal energy management strategy to control the Micro-Grid voltage and frequency by considering the load dynamics and transient stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 145, 108618.
- [6] Mendieta W, Cañizares CA. (2020). Primary frequency control in isolated microgrids using thermostatically controllable loads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(1), 93-105.
- [7] Shang L, Dong X, Liu C, Gong Z. (2021). Fast grid frequency and voltage control of battery energy storage system based on the amplitude-phase-locked-loop. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 13(2), 941-953.
- [8] Rathore B, Chakrabarti S, Srivastava L. (2021). A Self-Regulated Virtual Impedance control of VSG in a microgrid. *Electric Power Systems Research*, 197, 107289.
- [9] Worku MY, Hassan MA, Abido MA. (2020). Real time-based under frequency control and energy management of microgrids. *Electronics*, 9(9), 1487.
- [10] Xie X, Xu W, Huang C, Fan X. (2021). New islanding detection method with adaptively threshold for microgrid. *Electric Power Systems Research*, 195, 107167.
- [11] Adineh B, Keypour R, Davari P, Blaabjerg F. (2020). Review of harmonic mitigation methods in microgrid: From a hierarchical control perspective. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(3), 3044-3060.
- [12] Lakshmi MB, Saravanan S, Düzdağ S, Kılıç MH, Anuradha T., Deepak K, Malla SG. (2022, December). Voltage and Frequency Control of a PV-Battery-Diesel Generator based Standalone Hybrid System. In *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (pp. 1-7). IEEE.
- [13] Wang Z, Mu L, Xu Y, Zhang F, Zhu J. (2021). The fault analysis method of islanded microgrid based on the U/f and PQ control strategy. *International transactions on electrical energy systems*, 31(7), e12919.
- [14] Jan MU, Xin A, Abdelbaky MA, Rehman HU, Iqbal S. (2020). Adaptive and fuzzy PI controllers design for frequency regulation of isolated microgrid integrated with electric vehicles. *IEEE Access*, 8, 87621-87632.
- [15] Mohamed R, Helaimi M, Taleb R, Gabbar HA, Othman AM. (2020). Frequency control of microgrid system based renewable generation using fractional PID controller. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 19(2), 745-755.
- [16] Huang Q, Chen H, Xiang X, Li C., Li W, He X. (2021). Islanding detection with positive feedback of selected frequency for DC microgrid systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(10), 11800-11817.
- [17] Heins T, Joševski M, Gurumurthy S, Monti A. (2022). Centralized Model Predictive Control for Transient Frequency Control in Islanded Inverter-Based Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*.
- [18] Alhasnawi BN, Jasim BH, Sedhom BE, Hossain E, Guerrero JM. (2021). A new decentralized control strategy of microgrids in the internet of energy paradigm. *Energies*, 14(8), 2183.
- [19] Lu X, Guerrero JM, Sun K, Vasquez JC, Teodorescu R, Huang L. (2013). Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 683-692.
- [20] Malla P, Yilmaz M, Devi GR, Asker ME, Kılıç H, Malla SG. (2023). Neuro-Fuzzy Controller-based Standalone PV-Battery System. In *Renewable Resources and Energy Management* (pp. 107-115). CRC Press.
- [21] Khan HS, Mohamed IS, Kauhaniemi K, Liu L. (2021, November). Artificial neural network-based voltage control of DC/DC converter for dc microgrid applications. In *2021 6th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)* (pp. 1-6). IEEE.

- [22] Saxena NK, Gao WD, Kumar A, Mekhilef S, Gupta V. (2022). Frequency regulation for microgrid using genetic algorithm and particle swarm optimization tuned STATCOM. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 50(9), 3231-3250.
- [23] Regad M, Helaimi M, Taleb R, Othman AM, Gabbar HA. (2020). Frequency Control in Microgrid Power System with Renewable Power Generation Using PID Controller Based on Particle Swarm Optimization. In *Smart Energy Empowerment in Smart and Resilient Cities: Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities* (pp. 3-13). Springer International Publishing.
- [24] Kreishan MZ, Zobaa AF. (2021). Allocation of dump load in islanded microgrid using the mixed-integer distributed ant colony optimization. *IEEE Systems Journal*, 16(2), 2568-2579.
- [25] Kong X, Liu D, Sun F, Wang C, Huo X, Li S. (2021). Operation Strategy of Park Microgrid with Multi-stakeholder Based on Artificial Immune System. In *Design, Control, and Operation of Microgrids in Smart Grids* (pp. 121-150). Cham: Springer International Publishing.
- [26] Zaid SA, Kassem AM, Alatwi AM, Albalawi H, AbdelMeguid H, Elemery A. (2023). Optimal Control of an Autonomous Microgrid Integrated with Super Magnetic Energy Storage Using an Artificial Bee Colony Algorithm. *Sustainability*, 15(11), 8827.
- [27] Mishra D, Maharana MK, Kar MK, Nayak A, Cherukuri M. (2023). Modified Differential Evolution Algorithm for Governing Virtual Inertia of an Isolated Microgrid Integrating Electric Vehicles. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2023.
- [28] Taghieh A, Mohammadzadeh A, Zhang C, Kausar N, Castillo O. (2022). A type-3 fuzzy control for current sharing and voltage balancing in microgrids. *Applied Soft Computing*, 129, 109636.
- [29] Malla SG, Kılıç H, Kalantri S, Yilmaz M, Rao BK, Kiran KB, Asker ME. (2023). Takagi–Sugeno–Kang Fuzzy Controller-based Single-Stage Grid-Connected PV System. In *Renewable Resources and Energy Management* (pp. 127-135). CRC Press.
- [30] Fan W, Mohammadzadeh A, Kausar N, Pamucar D, Ide NAD. (2022). A new type-3 fuzzy PID for energy management in microgrids. *Advances in Mathematical Physics*, 2022.
- [31] Liu Z, Mohammadzadeh A, Turabieh H, Mafarja M, Band SS, Mosavi A. (2021). A new online learned interval type-3 fuzzy control system for solar energy management systems. *IEEE Access*, 9, 10498-10508.
- [32] Türk İ, Kılıç H. (2023). Bulanık Mantık Tip-3 Kullanılarak Mikro Şebeke Frekans Regülasyonu. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 14(3), 421-436.
- [33] Gheisarnejad M, Mohammadzadeh A, Khooban MH. (2021). Model Predictive Control Based Type-3 Fuzzy Estimator for Voltage Stabilization of DC Power Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(12), 13849-13858.
- [34] Aly AA, Felemban BF, Mohammadzadeh A, Castillo O, Bartoszewicz A. (2021). Frequency regulation system: a deep learning identification, type-3 fuzzy control and LMI stability analysis. *Energies*, 14(22), 7801.
- [35] Nabipour N, Qasem SN, Jermisittiparsert K. (2020). Type-3 fuzzy voltage management in PV/hydrogen fuel cell/battery hybrid systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 32478-32492.
- [36] Sibtain D, Rafiq T, Bhatti MH, Shahzad S, Kilic H. (2023). Frequency stabilization for interconnected renewable based power system using cascaded model predictive controller with fractional order PID controller. *IET Renewable Power Generation*, 17(16), 3836-3855.
- [37] Singh M, Basak P. (2020). Identification and nature detection of series and shunt faults in types I, III and IV wind turbines and PV integrated hybrid microgrid with a fuzzy logic-based adaptive protection scheme. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(22), 4989-4999.
- [38] Shi J. (2023). An interval type-3 fuzzy PID control system design and its application in solid oxide fuel cells power plant. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, (Preprint), 1-14.
- [39] Vinothkumar J, Hamizhselvan D. (2023). Enhancing controller efficiency in hybrid power system using interval type 3 fuzzy controller with bacterial foraging optimization algorithm. *J. Theor. Appl. Inf. Technol*, 101, 12.
- [40] Gheisarnejad M, Mohammadzadeh A, Farsizadeh H, Khooban MH. (2021). Stabilization of 5G telecom converter-based deep type-3 fuzzy machine learning control for telecom applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 69(2), 544-548.
- [41] Fan W, Mohammadzadeh A, Kausar N, Pamucar D, Ide NAD. (2022). Research Article A New Type-3 Fuzzy PID for Energy Management in Microgrids.
- [42] Qasem SN, Ahmadian A, Mohammadzadeh A, Rathinasamy S, Pahlevanzadeh B. (2021). A type-3 logic fuzzy system: Optimized by a correntropy based Kalman filter with adaptive fuzzy kernel size. *Information sciences*, 572, 424-44





## Design, Fabrication and Performance Analysis of a Portable, Antenna Analyzer Based, Quartz Crystal Microbalance Measuring System with Energy Dissipation

Ceyhun Ekrem Kırımli<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Acıbadem Mehmet Ali Aydınlar University, İstanbul, Türkiye  
ceyhun.kirimli@acibadem.edu.tr

(Geliş/Received: 18/12/2023;

Kabul/Accepted: 19/03/2024)

**Abstract:** Impedance measurements play a critical role in analyzing the electrical behavior of piezoelectric biosensors in general. Antenna analyzers are engineered to measure the specific case of input impedance for antenna systems. In this study small form factor antenna analyzer is repurposed to work as driving circuit for a Quartz Crystal Microbalance (QCM) biosensor in combination with a single board computer as an indication of how small and portable an impedance measuring system can be made, while allowing monitoring of important parameters of series and parallel resonance frequencies together with dissipation factor. A QCM crystal with a 10 MHz fundamental resonance frequency is employed to determine the limit of detection of the system in Bovine Serum Albumin (BSA) and glycerol solutions. Dissipation factor and phase angle were monitored during the experiments. Limit of detection is 20 µg/ml BSA in phosphate buffer saline (PBS) and 250 µl of glycerol in 100 ml of deionized water.

**Keywords:** Quartz Crystal Microbalance, dissipation factor, phase angle, Bovine Serum Albumin, impedance measurement.

### Enerji Yitimi Ölçebilen Taşınabilir Anten Analizörü Tabanlı Kuvars Kristal Mikroterazi Ölçüm Sisteminin Tasarımı, Üretimi ve Performans Analizi

**Özet:** Empedans ölçümü birçok piezoelektrik biyosensörün elektriksel davranışını analiz etmede kritik rol oynayan bir tekniktir. Anten analizörleri, anten sistemlerinin giriş empedansını ölçmek için tasarlanmıştır. Bu çalışmada bir empedans ölçüm sisteminin ne kadar küçük ve taşınabilir olabileceğinin bir kanıtı olarak, tek kartlı bir bilgisayarla kombinasyon halinde bir Kuvars Kristal Mikro Terazi (QCM) biyosensörü için sürüş devresi olarak çalışmak üzere küçük form faktörlü bir anten analizörü yeniden tasarlanmıştır. Seri ve paralel rezonans frekanslarının ve dağılım faktörünün önemli parametrelerinin izlenmesi 10 MHz temel rezonans frekansına sahip bir QCM kristali, sistemin Bovine Serum Albumin (BSA) ve Gliserol çözeltilerinde tespit limitini belirlemiştir. Deneyler sırasında dağılım faktörü ve faz açısı izlenmiştir. Saptama sınırı, fosfat tamponlu salinde (PBS) 20 µg/ml BSA ve 100 ml deiyonize suda 250 µl gliseroldür.

**Anahtar kelimeler:** Kuvars Kristal Mikroterazi, enerji yitim faktörü, faz açısı, sığır serum albümini, empedans ölçümü.

## 1. INTRODUCTION

QCM is a bulk acoustic wave piezoelectric biosensor where shear mode oscillations are used to determine natural frequency of the bulk material by means of resonance [1]. Shear mode oscillations require an AT cut of the quartz crystal, which has the highest thermally stable piezoelectric coefficients among all possible cuts [2]. QCM was first used in air or vacuum to measure weight deposited on the surface with sensitivity at microgram levels. Sauerbrey's equation [3] accurately converted a change in resonance frequency to the change in mass of the deposited material. QCM is still used in sputtering instruments and thermal deposition instruments to measure the thickness of deposited metal thin films at angstrom levels. Sauerbrey's equation however, cannot account for the large resonance frequency shift when the resonator is fully submerged in liquids. Kanazawa's work explained how the viscosity of the surround medium effects the resonance frequency as shown in Equation (1) [4]. With the help of further work of Voinova et. al. it was later demonstrated that, energy dissipation especially at the higher harmonics can be used to further understand not only viscosity of the medium but also the viscoelastic properties of the thin films deposited on the QCM surface in aqueous solutions [5].

There are different methods with which resonance frequency and/or dissipation factor can be determined electronically [6, 7]. Modern devices make use of the ring down method as it is the fastest way to measure these parameters. In the ring down method, QCM is first excited by applying an electrical potential at the resonance frequency with enough cycles to reach maximum oscillation amplitude. Then, the energy transfer is halted by turning of this driving voltage pattern, and the resonator is allowed to dissipate the loaded energy in time.

\* Corresponding Author: [ceyhun.kirimli@acibadem.edu.tr](mailto:ceyhun.kirimli@acibadem.edu.tr). Author's ORCID Number: 10000-0001-7470-0059

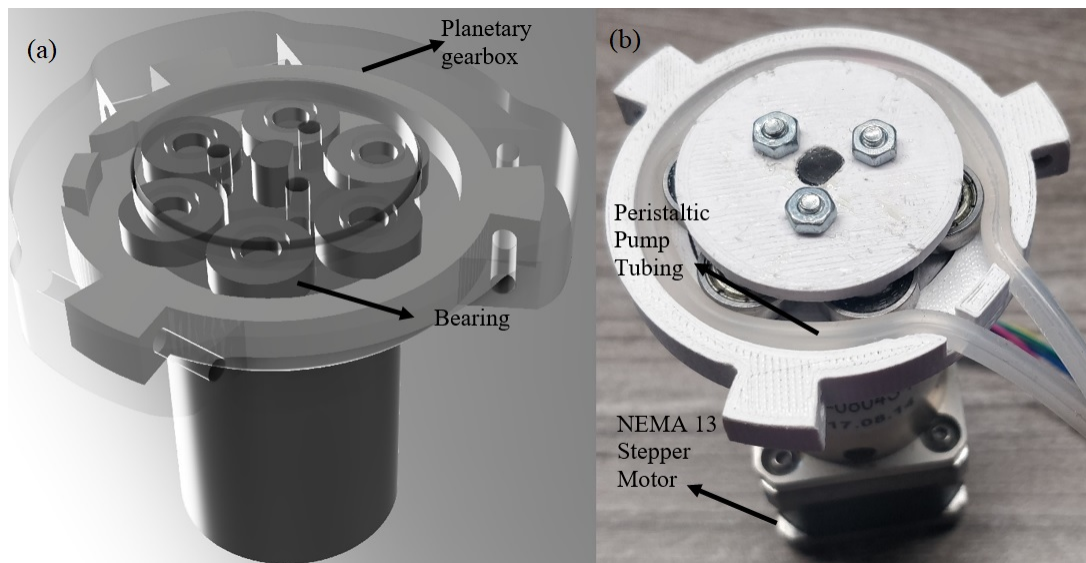
Dissipation factor is determined as explained in Equation (2), from the voltage pattern generated by the piezoelectric crystal while the oscillations amplitudes fades in time [8].

Impedance measurements can also be used to determine dissipation factor by means of measuring amplitude of the impedance and conductance respectively [8]. Among all the different methods of driving QCM, impedance measurements, although are time consuming, generate the most information about the system[6, 7]. Almost all biosensor applications require high sensitivity where the concentration of the analyte is low and diffusion limits the reaction time for the analyte to bind on the QCM surface and reach equilibrium. Antenna and impedance analyzers can be used to measure impedance, where the former can be small in size and inexpensive in comparison. These devices are also used in the literature not only to drive QCM biosensors but also other piezoelectric biosensors [9-14]. Portability of these instruments is also another concern, especially for field applications. OpenQCM's NEXT is the only commercially available platform as of today that can measure resonance frequency and dissipation simultaneously, however it lacks the ability to take measurements in elevated temperatures and it does not come with a pump or PC or any other portable single board computer (SBC). There are also portable measurements systems in the literature[15-18]. Adel et. al.'s study uses a frequency counter and heating and cooling air conditioning (AC) system for the flow cell although the AC system is only demonstrated to work between 19°C and 29 °C. which is not suitable for isothermal amplification techniques. Moreover the system does not include a portable pump and a PC is required and most importantly the system does not measure dissipation factor but only the resonance frequency [15]. Beißner et. al. developed an oscillator circuit with a control loop that can adjust the applied voltage driving the QCM. Although the chip design is interesting and robust, it only measures the resonance frequency shifts and no pumping system, PC or temperature control is integrated [16]. Liang et. al. developed a similar integrated circuit design and a flow cell lacking the ability to measure dissipation factor[17]. Muñoz et. al. developed a SBC based system with temperature control but only demonstrated a temperature range between 18°C and 31°C and the measurement device is a vector network analyzer which can simultaneously measure resonance frequency and dissipation factor. However, samples were injected using a syringe manually. In this study, a small form factor antenna analyzer circuit is combined to work in conjunction with a single board computer to fabricate a proof-of-concept QCM instrument capable of measuring both the resonance frequency and dissipation simultaneously. A peristaltic pump was designed, printed and integrated into the system to withstand temperatures above 95°C, which would allow any isothermal amplification reaction. The developed system also has an integrated SBC and flow cell. In order to measure the performance of the system BSA and Glycerol solutions are used to find the limit of detection (LOD). As 10 MHz fundamental resonance frequency QCM resonators are used in the study and the maximum frequency that can be measured by the system is 30 MHz. only the fundamental resonance frequency and the third harmonic are utilized during the experiments which obstructed application of detailed viscoelastic models. LOD of glycerol and BSA were determined to be 250µl/100ml deionized water and 20 µg/ml in PBS buffer respectively.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 *Portable Peristaltic Pump Design and Flow Cell*

A portable peristaltic pump was designed in Autodesk Fusion 360 and 3D printed using a fused deposition modeling (FDM) type printer (Zonestar P802QR2). Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) filament with a diameter of 1.75 mm was used as the sole 3d printed material. In the design 6 bearings (624zz) with inner diameter of 5mm, outer diameter of 13 mm and thickness of 4mm. Peristaltic pump tubing with an inner diameter 1.6mm and outer diameter of 3.2 mm (Tygon® formula 2375) was used to pump liquids at a flow rate of 100µl/min. Arduino Uno R3 controller board was used with a CNC shield, one A4988 driver. 16 microstepping is used with a NEMA13 step motor combined with a 51:1 planetary gearbox (14HS13-0804S-PG51). Grbl v1.1 was flashed into the Arduino to be used as the firmware and the gcode necessary to turn the stepper motor was sent through the serial port using python running on Raspberry Pi 4. The peristaltic pump system used in this study was a newer version of the one that is used by Cetin et.al.[19] The peristaltic pump and its components are shown in Figure 1.



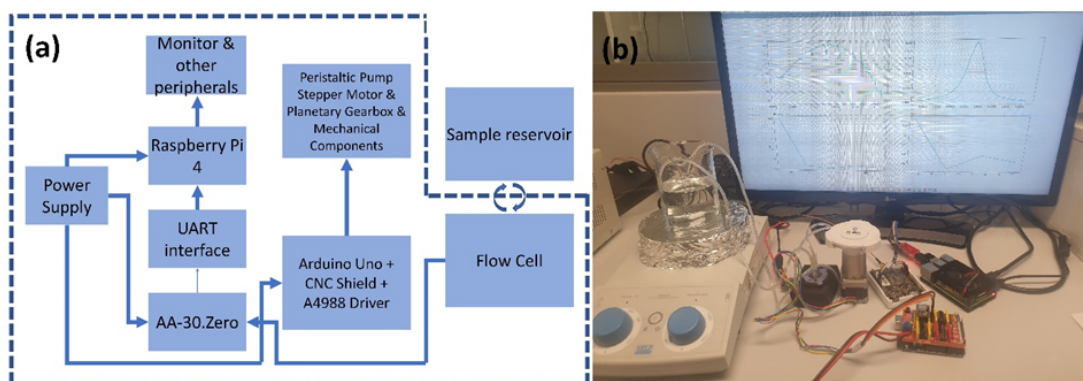
**Figure 1.** (a) 3D rendering of the peristaltic pump in Autodesk Fusion 360. Some parts are rendered transparent to illustrate the inner workings of the pump. (b) Peristaltic pump is printed and assembled (incompletely) to show the inner workings of the pump, as well as the tubing.

## 2.2 Connection of antenna analyzer with a Single Board Computer

An inexpensive vector high frequency antenna analyzer (Rigexpert AA-30.Zero) was chosen for this study. Important specifications of the antenna analyzer is summarized in Table 1. Maximum power consumption of the antenna analyzer is approximately 0.65 watts (5V DC voltage and max of 150 mA current). It weighs 65 gr and has a frequency range from 60kHz to 30 MHz with a frequency resolution of 1 Hz. It has a universal asynchronous receiver/transmitter (UART) communication interface with a 38400 baud rate. Raspberry Pi 4 Model B with 8 GB of ram is used as a single board computer. (Figure 2)

**Table1.** Specifications of the antenna analyzer used to monitor impedance of QCM.

Frequency range	0.06 to 30 MHz
Frequency resolution	1 Hz
Communication interface	UART, 38400 baud
SWR(standing wave ratio) measurement range	1 to 100



**Figure 2.** (a) A schematic diagram of the components of the systems. Arrows indicate how each component is connected to each other. Every component in the dashed line can be fitted in a portable enclosure. (b) A picture of the components during a detection experiment.

### 2.3 BSA and Glycerol LOD Experiments

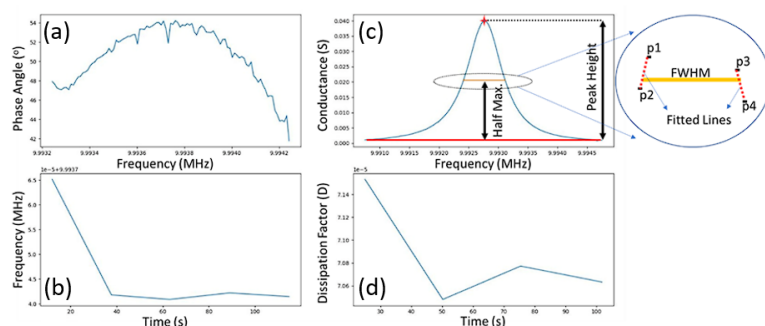
Glycerol (Sigma) and BSA (Sigma) are spiked in 100 ml deionized water and 100 ml 1x PBS buffer solutions respectively. Concentrations ranging from 250 $\mu$ l/100ml to 750  $\mu$ l /100ml and from 20  $\mu$ g/ml to 60  $\mu$ g/100ml for Glycerol and BSA were prepared to measure LOD. Magnetic stirrer is used at room temperature to speed the diffusion and homogenize the solution before the solution reaches the flow cell for glycerol experiments. Flow cell had a total volume of 30  $\mu$ l and the total volume of the liquid inside the tubing was approximately 1750  $\mu$ l. For BSA detections 2ml Eppendorf tubes were used as sample reservoir and samples were vortexed for 30 seconds before experimentation. LOD experiments were performed as described before[20] in 3-sigma fashion. A standard deviation of the resonance frequency position was calculated by monitoring the phase angle peak position in time for 30 min in deionized water and 1x PBS for glycerol and BSA respectively. These values are determined to be 2.5 Hz at room temperature for deionized water and 3.5 Hz for 1xPBS solution. 200 data points were collected in each sweep at a fixed window size of 1 kHz for the fundamental resonance frequency around 10 MHz for the phase angle sweeps. Peak tracking was applied for phase angle sweeps. Each sweep's duration was approximately 25 seconds. For dissipation, 200 data points were collected at a fixed windows size of 4 kHz. Peak tracking was not applied for the conductance peak as the window was large enough to compensate for the low frequency shifts, especially at concentrations close to the LOD. Any shift bigger than 7.5 Hz for glycerol solutions ( $\sigma_{\text{glycerol}}=2.5\text{Hz}$ ) and 10.5 Hz for BSA in 1x PBS solutions ( $\sigma_{1x\text{PBS}}=3.5\text{Hz}$ ) were considered as detection and LOD were measured as the lowest such concentrations for each analyte.

### 2.4 Data Collection and Analysis

Miniconda is installed in the Raspberry Pi 64 bit operating system. Spyder compiler is used to write a routine to control not only the peristaltic pump, but also the parameters of AA-30.Zero during impedance measurements as explained before[9, 20]. Resonance frequency and dissipation factor was calculated and plotted in real time as can be seen in Figure 3. Real time monitoring of the resonance frequency shift was achieved by measuring the phase angle of the impedance, and sweep window was adjusted to track the moving peak position in time as discussed before[9, 20]. Dissipation factor, D, was calculated from the conductance peak as described before using the equation (1) [8].

For this, a baseline is first measured from the average of the first 3 and last 3 values of the conductance measurement, as shown in Figure 3 below. The frequency of the peak point of the conductance was used to determine the height of the conductance peak, which is then used to calculate the half-maximum of the peak. The width at this level is then calculated from the 4 discrete data points of the conductance graph that are closest in distance. These 4 points were then used to calculate the equation of the lines passing through them as shown in figure 3. The distance between intersections of these lines with the half-maximum is used to calculate the Full Width at Half Maximum (FWHM). This value is then divided by the frequency of the peak position to calculate the dimensionless dissipation factor finally as in (1).

$$D = \frac{FWHM}{f_0} \quad (1)$$



**Figure 3.** (a) Frequency (Hz) vs phase angle(degrees) data measured in the last sweep. (b) Time (seconds) vs peak position of the phase angle (Hz) plot showing time evolution of the peak position during detection. (c) Frequency vs Conductance (siemens,S) data measured in the last sweep. Inset to the right is a schematic illustrating how the FWHM is determined from the half maximum line. (d) Time(seconds,s) vs Dissipation factor (D,dimensionless) plot showing time evolution of the dissipation factor during detection.

### 3. FINDINGS AND DISCUSSION

Figure 4a shows the results of the limit of detection experiments for glycerol detections. 3 different concentrations, 250  $\mu\text{l}$ , 500  $\mu\text{l}$  and 750  $\mu\text{l}$  of glycerol dissolved in 100 ml of deionized water, are detected 3 times each. LOD was measured to be 250  $\mu\text{l}$  of glycerol in 100ml of deionized water. This was, in comparison to best performing portable antenna analyzer (RigExpert Stick 230) from the same manufacturer, less than 1.5 times less sensitive. Shaded area in figure 4a represents the standard deviation of all 3 detections in each concentration. A frequency shift of  $\approx 8.5$  Hz was measured at LOD. Equation (2) was used to calculate the viscosity of the glycerol mixtures from the frequency shifts.

$$\Delta f = -f_0^{3/2} \cdot \left( \frac{\eta_L \rho_L}{\pi \mu_Q \rho_Q} \right)^{1/2} \quad (2)$$

In Equation (2),  $\Delta f$  represents resonance frequency shift. This is calculated from the average resonance frequency position between 27<sup>th</sup>-30<sup>th</sup> min. following the spiking of the glycerol into the deionized water.  $\eta_L$  and  $\rho_L$  represent the absolute viscosity of the liquid (0.01002 g/(cm.s) at room temperature) and density of the liquid (0.9982 g/cm<sup>3</sup> at room temperature) respectively.  $\mu_Q$  and  $\rho_Q$  represents the shear modulus of the quartz crystal (2.947 x 10<sup>11</sup> g/(cm.s<sup>2</sup>)) and density of the quartz (2.648 g/cm<sup>3</sup>) respectively. These viscosity values are then used to calculate the resonance frequency shifts ( $\Delta f$ ) and the measured and known concentrations are plotted in figure 4b using tables as described before [20].  $\Delta D$  vs time graphs were also plotted in Figure 4c. As expected, the frequency shift and dissipation factor shifts were inversely proportional as energy dissipation increased as the viscosity of the bulk fluid increased with the increasing concentrations of Glycerol. Unfortunately viscoelastic properties of the bulk liquid cannot be determined as dissipation factor and resonance frequency shifts of higher harmonics are required for such models [5] and fundamental resonance peak is usually omitted.

When compared to the previous results with different antenna analyzers from the same manufacturer, AA-30.Zero gave the least performance in terms of LOD. This was expected as, in comparison to those, it is slower and hence less accurate. Sweep rate is important in the sense that less data points can be collected at a given time lowering the time resolution of each sweep, making it more difficult to determine the peak position from a sweep using the algorithm described before [9].

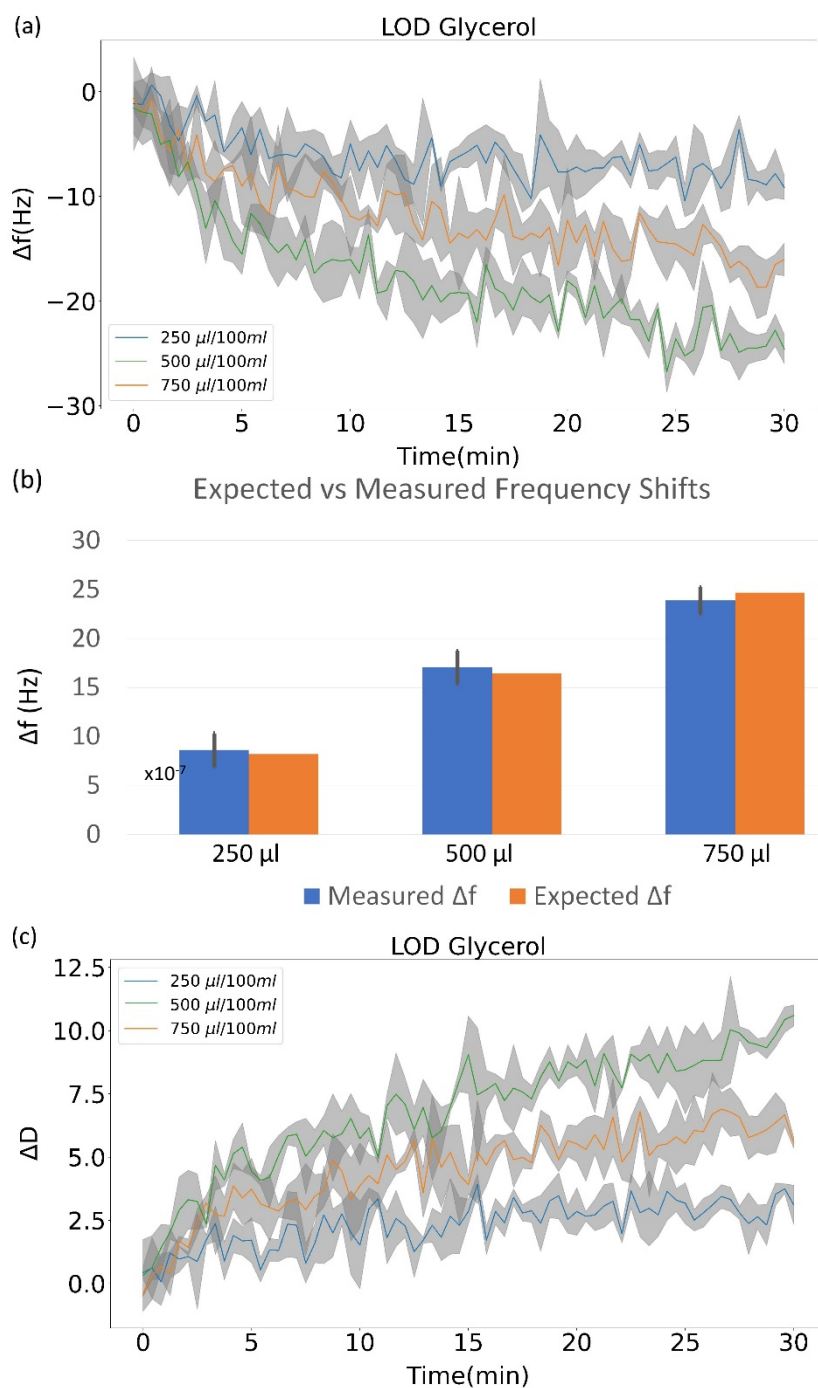
To measure the performance of the system using an analyte not only increasing the viscosity of the bulk fluid as glycerol, BSA was used as it can be physically adsorbed even on a gold electrode. BSA concentration were prepared in 1x PBS buffer as in most biosensor studies involving detection of analytes based on proteins or small peptides, BSA is used as a remedy to overcome the non-specific binding problem [21-24].  $\Delta f$  and  $\Delta D$  vs time shifts of concentrations ranging from 20  $\mu\text{g/ml}$  to 60  $\mu\text{g/ml}$  were plotted in Figure 5a and 5b respectively. LOD of BSA in 1xPBS solutions were determined to be 20  $\mu\text{g/ml}$ . Frequency shifts in each concentration after 30min are also plotted in figure 5c.

#### 3.1 Conclusion and Evaluations

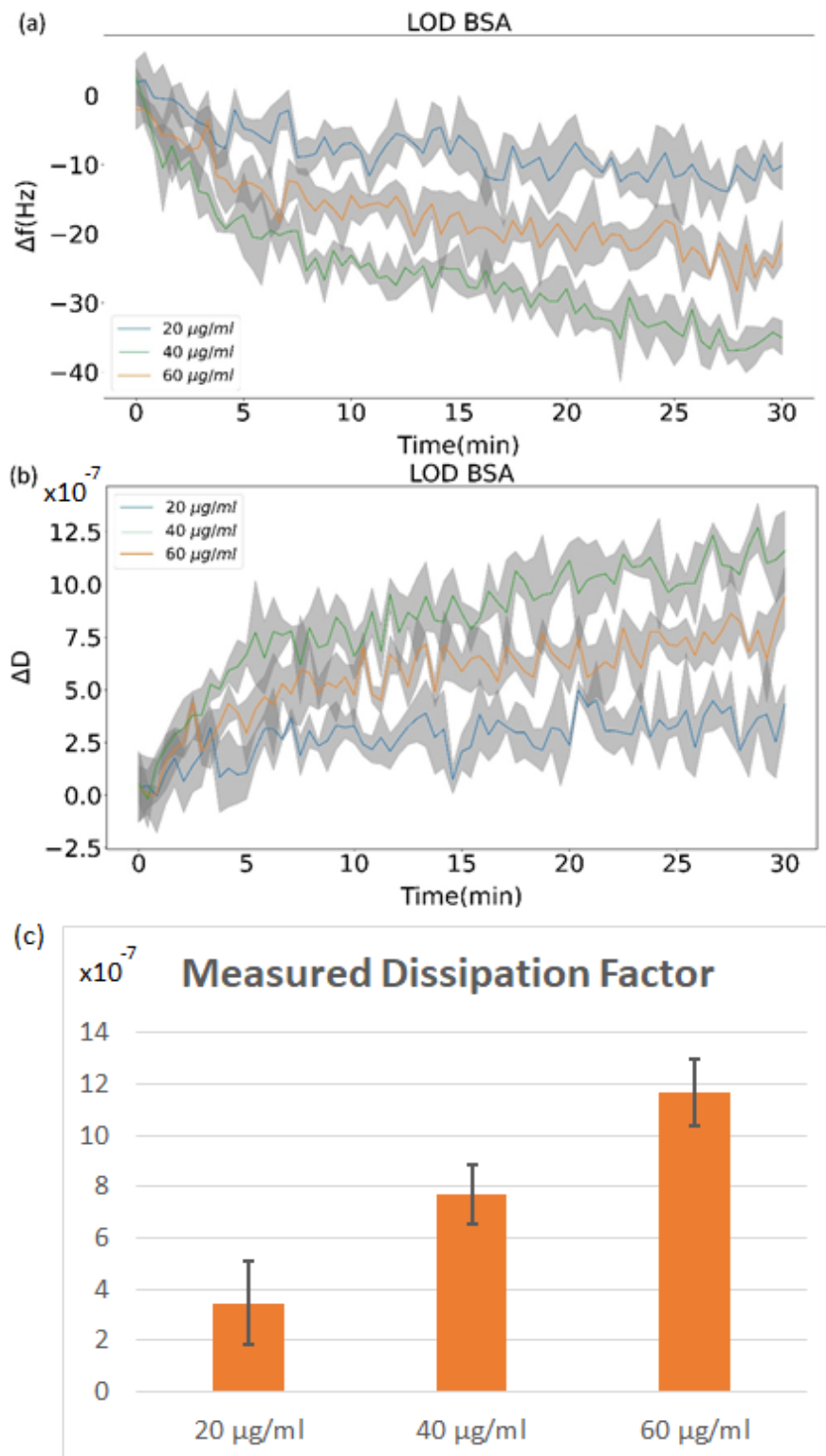
A portable impedance based QCM biosensing system was designed and prototyped as proof of concept in this study. All the components are 3d printed and a single board computer was utilized to analyze data in real time. To measure the performance of the system, BSA and glycerol solutions were prepared and LODs were measured. AA30.zero antenna has a very small form factor; however, the analysis of real time data requires computing power which requires the use of single board computer. Majority of power consumed by the system is not due the measurements but mainly due to the Raspberry Pi 4 computer and peristaltic pump. To reduce the power consumption of the peristaltic pump, NEMA13 stepper motor was used instead of NEMA17. The motor draws 0.6 A at 20V. Total system power was  $\approx 18$  watts including the Raspberry Pi 4, which is very high as it would take  $\approx 4$  hrs to deplete a commercially available 20000 mAh power bank. This could be improved by using a more efficient SBC or a smaller stepper motor as torque was already increased using a 51:1 planetary gearbox.

The system can be developed as two parts in the future, consisting of a driving system including the SBC and the antenna analyzer and a second component consisting of the flow cell and the peristaltic pump. Temperature resistant stepper motors are available that can withstand ambient air temperatures up to 130 oC. When combined with temperature resistant small inner diameter peristaltic pump tubing this second component could be fitted inside a drying oven so that biosensing can be achieved at elevated temperatures with an exceedingly small (<100 $\mu\text{l}$ ) sample volume for the fraction of the price of an equivalent QCM device. Machine learning algorithms can also be run on impedance measurements of QCM biosensors as studied before [20] and modern SBCs are

already equipped with central processing units (CPUs) and random access memory (RAM) enough to cope with such light machine learning loads. Further work in this direction has already been initiated by the researcher.



**Figure 4.** (a) Resonance frequency shifts of observed when 250  $\mu\text{l}$ , 500  $\mu\text{l}$  and 750  $\mu\text{l}$  of liquid is dissolved in deionized water. (b) Expected and measured resonance frequency shifts due to viscosity change of the bulk liquid. (c) Dissipation factor shift due to viscosity change of the bulk liquid. Shaded area represents the standard error in 3 experiments for each concentration.



**Figure 5.** (a) Resonance frequency shifts of observed when 20  $\mu\text{g/ml}$ , 40  $\mu\text{l/ml}$  and 60  $\mu\text{g/ml}$  of BSA is dissolved in 1x PBS. (b) Dissipation factor shift due to adsorption of BSA on QCM surface for the same concentrations. Shaded area represents the standard error in 3 experiments for each concentration. (c) Represents the average dissipation factor change in the last 3 minutes (28<sup>th</sup> till 30<sup>th</sup> min) of each experiment.

## References

- [1] Johannsmann D. *The Quartz Crystal Microbalance in Soft Matter Research : Fundamentals and Modeling*, 1st ed. Cham: Springer International Publishing : Imprint: Springer., 2015, pp. 1 online resource (XX, 387 pages 123 illustrations, 9 illustrations in color.
- [2] Soewito B. "Designing and Manufacturing Quartz Crystal Oscillators," in *Computational Intelligence and Efficiency in Engineering Systems*, G. Borowik, Z. Chaczko, W. Jacak, and T. Łuba Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 293-306.
- [3] Sauerbrey G. "Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung," *Zeitschrift für Physik*, vol. 155, no. 2, pp. 206-222, 1959/04/01 1959, doi: 10.1007/BF01337937.
- [4] Keiji Kanazawa K, Gordon JG. "The oscillation frequency of a quartz resonator in contact with liquid," *Anal Chim Acta*, vol. 175, pp. 99-105, 1985/01/01/ 1985, doi: [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)82721-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)82721-X).
- [5] Voinova MV, Rodahl M, Jonson M, Kasemo B. "Viscoelastic Acoustic Response of Layered Polymer Films at Fluid-Solid Interfaces: Continuum Mechanics Approach," *Phys. Scr.*, vol. 59, no. 5, p. 391, 1999/05/01 1999, doi: 10.1238/Physica.Regular.059a00391.
- [6] Alassi A, Benammar M, Brett D. "Quartz Crystal Microbalance Electronic Interfacing Systems: A Review," *Sensors-Basel*, vol. 17, no. 12, p. 2799, 2017. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2799>.
- [7] Arnau A. "A Review of Interface Electronic Systems for AT-cut Quartz Crystal Microbalance Applications in Liquids," *Sensors-Basel*, vol. 8, no. 1, pp. 370-411, 2008. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/8/1/370>.
- [8] Banica F-G. *Chemical sensors and biosensors : fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2012, pp. xxxiii, 541 pages.
- [9] Kirimli CE, Shih W-H, Shih WY. "DNA hybridization detection with 100 zM sensitivity using piezoelectric plate sensors with an improved noise-reduction algorithm," *Analyst*, vol. 139, no. 11, pp. 2754-2763, 2014.
- [10] Kirimli CE, Shih W-H, Shih WY. "Specific in situ hepatitis B viral double mutation (HBVDM) detection in urine with 60 copies ml<sup>-1</sup> analytical sensitivity in a background of 250-fold wild type without DNA isolation and amplification," *Analyst*, vol. 140, no. 5, pp. 1590-1598, 2015.
- [11] Kirimli CE, Shih W-H, Shih WY. "Amplification-free in situ KRAS point mutation detection at 60 copies per mL in urine in a background of 1000-fold wild type," *Analyst*, vol. 141, no. 4, pp. 1421-1433, 2016.
- [12] Kirimli CE, Shih W-H, Shih WY. "Piezoelectric Plate Sensor (PEPS) for Analysis of Specific KRAS Point Mutations at Low Copy Number in Urine Without DNA Isolation or Amplification," *Biosensors and Biodetection: Methods and Protocols, Volume 2: Electrochemical, Bioelectronic, Piezoelectric, Cellular and Molecular Biosensors*, pp. 327-348, 2017.
- [13] Kirimli CE, Elgun E. "A Comparison of Impedance and Antenna Analyzers on the Basis of Machine Learning Assisted Limit of Detection Experiments," in *2022 International Workshop on Impedance Spectroscopy (IWIS)*, 27-30 Sept. 2022 2022, pp. 61-65, doi: 10.1109/IWIS57888.2022.9975132.
- [14] Muckley ES, Collins L, Srijanto BR, Ivanov IN. "Machine Learning-Enabled Correlation and Modeling of Multimodal Response of Thin Film to Environment on Macro and Nanoscale Using "Lab-on-a-Crystal"," *Adv. Funct. Mater.*, <https://doi.org/10.1002/adfm.201908010> vol. 30, no. 10, p. 1908010, 2020/03/01 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201908010>.
- [15] Adel M, Allam A, Sayour AE, Ragai HF, Umezu S, Fath El-Bab AMR. "Design and development of a portable low-cost QCM-based system for liquid biosensing," *Biomed. Microdevices*, vol. 26, no. 1, p. 11, 2024/01/18 2024, doi: 10.1007/s10544-024-00696-0.
- [16] Reißner S *et al.*, "Low-cost, in-liquid measuring system using a novel compact oscillation circuit and quartz-crystal microbalances (QCMs) as a versatile biosensor platform," *J. Sens. Sens. Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 341-350, 2017, doi: 10.5194/jsss-6-341-2017.
- [17] Liang J, Zhang J, Wang P, Liu C, Qiu S, Ueda T. "Development of Portable Quartz Crystal Microbalance for Biosensor Applications," *Sens. Mater.*, vol. 28, no. 3, 2016.
- [18] Muñoz GG *et al.*, "Quartz crystal Microbalance with dissipation monitoring for biomedical applications: Open source and low cost prototype with active temperature control," *HardwareX*, vol. 14, p. e00416, 2023/06/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2023.e00416>.
- [19] Cetin I, Yilmaz G, Halilibrahimoglu H, Kirimli CE. "'Do It Yourself' Peristaltic Pump and Flowcell for QCM Biosensor," in *2017 21st National Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT)*, 24 Nov.-26 Dec. 2017 2017, pp. i-iv, doi: 10.1109/BIYOMUT.2017.8479100.
- [20] Kirimli CE, Elgun E, Unal U. "Machine learning approach to optimization of parameters for impedance measurements of Quartz Crystal Microbalance to improve limit of detection," *Biosens. and Bioelectron.: X*, vol. 10, p. 100121, 2022/05/01/ 2022.
- [21] Andersson L-O, Rehnström A, Eaker DL. "Studies on "Nonspecific" Binding," *Eur. J. Biochem.*, <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1971.tb01403.x> vol. 20, no. 3, pp. 371-380, 1971/06/01 1971.
- [22] Reimhult K, Petersson K, Krozer A. "QCM-D Analysis of the Performance of Blocking Agents on Gold and Polystyrene Surfaces," *Langmuir*, vol. 24, no. 16, pp. 8695-8700, 2008/08/01 2008, doi: 10.1021/la800224s.



- [23] Xiao Y, Isaacs SN. "Enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) and blocking with bovine serum albumin (BSA)—not all BSAs are alike," *J. Immunol. Methods*, vol. 384, no. 1, pp. 148-151, 2012/10/31/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jim.2012.06.009>.
- [24] Dolatshahi-Pirouz A, Rechendorff K, Hovgaard MB, Foss M, Chevallier J, Besenbacher F. "Bovine serum albumin adsorption on nano-rough platinum surfaces studied by QCM-D," *Colloids Surf. B*, vol. 66, no. 1, pp. 53-59, 2008/10/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.05.010>.



## Kriyojenik İşlem Uygulanan Elektro Erozyon Elektrot Takımının Performansının Araştırılması

Mustafa AY<sup>1\*</sup>, Savaş APAK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mekatronik Müh., Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Milli Eğitim Müdürlüğü, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> mustafaay@firat.edu.tr, <sup>2</sup> savas045@hotmail.com

(Geliş/Received: 22/12/2024;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Öz:** Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının elektro erozyon ile işleme (EEİ) tezgâhında kullanılan elektrot malzemesinin kriyojenik işlem sonucunda takımın işleme performansı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, pirinç malzemeden seçilen elektrotlar [Oda sıcaklığı / -184°C / Oda sıcaklığı] arasında bir çevrim ile kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Deneylerde pirinç ve kriyojenik pirinç elektrotlarla boşalım akımı (Ip), vurum süresi (Ton), bekleme süresi (Toff) ve boşluk voltajı (Vg) gibi en etkili işlem parametreleri değişken seçilmiştir. Deneyler sonucunda ürün kalitesini belirleyen, tekrar katılacak katman kalınlığı, malzeme kaldırma oranı ve koniklik açısı ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir. Elektrotlara uygulanan kriyojenik işlem sonucunda, EEİ işlem performansında pozitif iyileşmeler elde edildiği tespit edilmiştir. Tekrar katılacak katman kalınlığı, malzeme kaldırma oranı ve koniklik miktarı oranlarının Ip, Vg ve Ton pozitif yönde Toff ise negatif yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ), Kriyojenik işlem, Ti-6Al-4V.

### Cryogenic Heat Treatment of Electro Discharge Machining Electrode Tooling Investigation of Performance

**Abstract:** In this study, the machining performance of the electrode material used in the Electro Discharge Machining (EDM) of Ti-6Al-4V alloy was investigated as a result of cryogenic treatment. Within the scope of the study, electrodes selected from brass material were subjected to cryogenic treatment with a cycle between [Room temperature / -184°C / Room temperature]. In the experiments, the most effective process parameters such as discharge current (Ip), pulse on time (Ton), pulse off time (Toff) and gap voltage (Vg) were selected as variables with brass and cryogenic brass electrodes. As a result of the experiments, the re-solidified layer thickness, material removal rate and taper angle, which determine the product quality, were measured and evaluated. As a result of the cryogenic treatment applied to the electrodes, it was found that positive improvements in EEI performance were obtained. It was concluded that re-solidified layer thickness, material removal rate, tool wear rate and bevel amount ratios are positively affected by discharge current, gap voltage and pulse on time and negatively affected by pulse off time.

**Key words:** Electrical Discharge Machining (EDM), Cryogenic treatment, Ti-6Al-4V.

#### 1. Giriş

Ti-6Al-4V alaşımları, özellikle yüksek korozyon direnci, yorulma direnci ve yüksek sıcaklıklarda çalışma kabiliyeti gibi birçok üstün özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv, petrokimya, nükleer endüstrisinde ve özellikle türbin motorlarının farklı bileşenlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [1]. Üstün özelliklere sahip malzemeler alanındaki hızlı gelişmeler, yeni teknolojik süreçlerin geliştirilmesi, geleneksel işleme yöntemleri ile elde edilemeyen sonuçlara ulaşma arayışı modern üretim teknolojisi alanındaki araştırmalara ivme kazandırmıştır. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) yöntemi, birçok imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan ileri imalat yöntemlerinden birisidir. Bu yöntem, elektriksel arkın oluşturduğu termal enerjinin ısı üretmek için kullanıldığı, iş parçasından ve takım yüzeyinden malzemenin erimesi ve buharlaşmasıyla sonuçlanan termal enerjiye dayalı bir süreçtir [2]. EEİ, tungsten, titanyum alaşımları, nikel alaşımları, takım çelikleri, bor karbür, silisyum karbür, alüminyum ve alaşımları, germanyum, polikristalin elmaslar, kompozit malzemeler, manyetik malzemeler, metalik cam vb. gibi sertlik gibi mekanik özelliklerine bakılmaksızın iletken olan her türlü malzemeyi işleyebilir [3-6]. Bunun yanı sıra, diğer geleneksel işleme teknikleriyle karşılaştırıldığında, daha düşük malzeme kaldırma oranı, yüksek takım aşınma oranı, esas malzeme yapısını bozan yüksek ısı girdisi ve işleme süresi gibi bazı dezavantajlara sahiptir. Takım veya iş parçası hareketlerinin iyileştirilmesi, farklı dielektrik akışkanların kullanılması ve toz süspansiyonlarının eklenmesi, farklı takım malzemelerinin kullanılması veya bunların takım

\* Sorumlu yazar: [mustafaay@firat.edu.tr](mailto:mustafaay@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-9056-9975, <sup>2</sup> 0009-0000-9042-5771

elektrot özelliklerinin geliştirilebilmesi için belirli işlemlere tabi tutulması gibi EEİ alanında birçok iyileştirme tekniği rapor edilmiştir [7-11].

İmalat endüstrisinde maliyet artışına neden olan takım ömrünü iyileştirmek için yeni yaklaşımlar geliştirilmektedir. Kriyojenik işlem, östenitin martensite dönüşümünü tamamlamak için uygun soğutma, ısıtma ve ısıtma sürelerinin seçilmesini içerir. Kriyojenik işlem ile malzemelerin fiziksel, mekanik ve termal iletkenlik özelliği de iyileştirilebilir [12-14]. Altuntaş ve diğerleri [15], sıg kriyojenik (-40 °C) ve doğal yaşlandırma işlemlerinin Al7075 alaşımındaki ikinci fazların çökmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Özellikle kriyojenik ve doğal yaşlanma süreçleri sırasında dislokasyon yoğunlukları, düzlemlerin gerinim değerleri, doku katsayıları ve sonrasında kristal yapıya olan etkiler değerlendirilmiş, yaşlandırma öncesinde uygulanan kriyojenik işlemin malzemenin sertliğini ortalama %15 artırdığı rapor edilmiştir. Önceki çalışmalarda, geleneksel talaşlı işlemede takım veya iş parçası kriyojenik ve soğuk işleme tabi tutulduğunda takım ömrünün ve işleme performansının arttığı rapor edilmiştir [16-19]. Ancak, EEİ yönteminde takım elektrot üzerine kriyojenik işlemin etkisini belirlemek için kısıtlı sayıda araştırma yapılmıştır. Sing ve Grover, EN-31 malzemesini kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş bakır, pirinç ve grafit elektrotlar ile işleyerek kriyojenik işlemin takım aşınma oranı ve malzeme kaldırma miktarı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Kriyojenik işlemin malzeme kaldırma oranında önemli bir iyileşme ve takım aşınma oranında azalma sağladığını rapor etmişlerdir [20]. Kumar ve diğerleri [21], Inconel 718'in elektro erozyon ile işlemede iyonize tankına eklenen metal tozunun etkinliğini değerlendirmek için yaptıkları deneylerde kriyojenik işlem görmüş bakır elektrotlar kullanmışlar ve kriyojenik ısıl işlemin takım aşınma oranında önemli bir azalma gözlemlemişlerdir. Jafferson ve Hariharan, kriyojenik ısıl işlemler ve normal mikro elektrotların (pirinç boru, bakır boru ve tungsten çubuğu) takım aşınma oranlarını deney sonuçlarını karşılaştırmış. Kriyojenik işlemler tungsten, pirinç ve bakır elektrot için takım aşınma oranında sırasıyla % 58,% 51 ve % 35 lik bir azalma gözlemlendiğini rapor etmişlerdir [22]. Gill ve Singh [23], EEİ ile derin kriyojenik işlem görmüş Ti6246 titanyum alaşımının işlenmesi sırasında kriyojenik işlemin etkisini araştırmış ve iş parçası malzemesinin termal ve elektrik iletkenliğindeki artıştan dolayı takım aşınma oranının % 34,78 oranında azaldığını bildirmişlerdir. Yıldız ve diğ. [24], soğuk ve kriyojenik işlemin berilyum-bakırın işlenebilirliği üzerindeki etkisini araştırmış ve malzeme kaldırma oranında yaklaşık % 20 ila % 30 artış olduğunu bildirmişlerdir.

Geçmiş dönemlerde yapılan bilimsel araştırmalarda hem geleneksel imalat hem de ileri imalat endüstrisinde maliyet artışına neden olan takım ömrünü iyileştirmek için birçok yeni yaklaşımların denendiği tespit edilmiştir. Ancak, EEİ yönteminde takım elektrot olarak kullanılan pirinç malzemesine kriyojenik işlemin etkisini belirlemek için kısıtlı sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışma, kriyojenik işlemler ve ısıl işlemsiz pirinç elektrotlar ile Ti-6Al-4V titanyum alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde kriyojenik işlemin etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Ek olarak, kullanılan parametre değişkenlerinin, Malzeme Kaldırma Oranı, Tekrar Katılaştıran Katman Kalınlığı ve Delik Koniklik Açısı üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır.

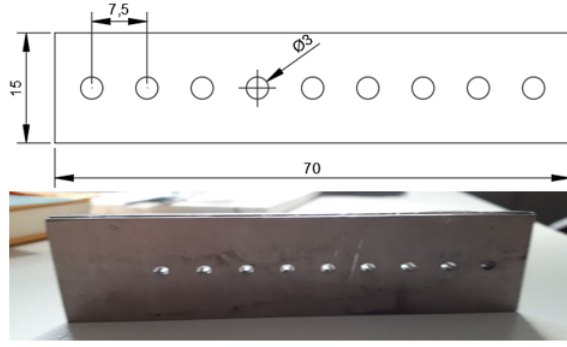
## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Deney malzemeleri ve elektrotların hazırlanması

Deneyisel çalışmalarda iş parçası olarak kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1'de görülen  $15 \times 70 \times 6$  boyutlarında Ti-6Al-4V titanyum alaşımı plakalar kullanılmıştır. Deney öncesinde işlem süresini kısaltmak için numunelere CNC freze tezgâhında Şekil 1'de görüldüğü gibi 2,5 mm çapında ön delme işlemi yapıldıktan sonra 3mm lik elektrotlar ile EEİ ile delik genişletme işlemi yapılmıştır. Ön delme işlemi EEİ işleminde; basınçlı dielektrik sıvı uygulaması ile ergimiş metalin ortamdan uzaklaştırmasını kolaylaştıracağı, ayrıca kör deliğe nazaran ortamdan uzaklaştırılmayan artık metal kalıntılarının elektrot-işparçası arasında kalarak kısa devre ihtimalini de zayıflatacağı düşünülmektedir.

**Tablo 1.** Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Kimyasal bileşimi (%)							
Ti	Al	V	H	O	N	C	Fe
Kalan	6,25	4,25	0,0029	0,110	0,003	0,011	0,026
Mekanik özellikleri							
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Sertlik (HRC)	Erime noktası (°C)	Çekme mukavemeti (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Elastik modül (MPa)	Elektrik direnci ( $\mu\Omega \cdot m$ )	Isı iletkenliği (W/mK)
4,43	36-39	1660	910	840	113	1,7	6,7



Şekil 1. EEİ ile işlenen numunelerin boyutları ve işlem sonrası görüntüsü.

Yapılan araştırmalar ışığında; Titanyum alaşımlarının farklı elektrot malzemesi ile işlenmesi sonucunda pirinç elektrot malzemesinde iyi derecede malzeme kaldırma hızının yanı sıra yüksek takım aşınması meydana geldiği rapor edilmiştir [25, 26]. Kriyojenik işlem ile pirinç elektrotlarda yüksek malzeme kaldırma hızı yanı sıra düşük elektrot aşınma oranı elde edilmesi maliyet açısından fayda sağlayacağı düşüncesi ile elektrot malzemesi olarak pirinç elektrotlar tercih edilmiştir. EEİ tezgahında delik genişletme işlemleri için Şekil 2’de verilen 3mm çap ve 70mm boyunda 18 adet pirinç elektrot kullanılmıştır.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan elektrotlar.

Bu elektrotlardan 9 adedi, özelliklerini geliştirmek için kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Kriyojenik işlem çevrimi, Dönüşüm Isıl İşlem San. Ve Tic. Ltd. Şti. bünyesinde bulunan Şekil 3 a’da görseli paylaşılan dikey kap içerisinde azot gazı kullanılarak Şekil 3 b’de gösterildiği gibi, elektrotlar 1°C / dk soğutma hızında kademeli olarak -184°C’ye düşürülmüş ve bu sıcaklıkta 24 saat süre ile kriyojenik işlemci kabında tutulmuştur. Sonra sıcaklık aynı hızda kademeli olarak tekrar oda sıcaklığına yükseltilmiştir. Bu konuda yapılan çalışmalarda genellikle kriyojenik sıcaklıkları -150 °C’nin altındaki sıcaklıklar olarak tanımlamışlardır. Ancak, son zamanlarda sıcaklıklar -185 °C üzerine çıkarılarak derin kriyojenik işlem etkisi de çalışılmaktadır [27,28].



Şekil 3. Pirinç elektrot için; a) kriyojenik işlem kabı, b) Kriyojenik işlem çevrimi.

Kriyojenik işlem öncesi ve sonrası, elektrotların yüzey sertliği ve elektrik iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Elektriksel iletkenlik katsayısı ölçümleri, FAYTRONX PHY2030 marka ölçüm cihazında dört nokta prob metodu

kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, oda sıcaklığında 1Hz-1MHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Numunelere AC 100 MV gerilim uygulanmıştır. Mikro sertlik ölçümler Tronic DHV-1000 Micro Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Ölçüm sırasında elektrotlara uygulanan yük 0,95 kg olup bekleme süresi 15 saniye olarak seçilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Pirinç elektrotların elektrik iletkenlik ve mikro sertlik değerleri

Elektrot	Elektrik iletkenlik	Sertlik (HV)
Pirinç Elektrot	37,091 $\Omega$ m	110,512 HV
Kriyojenik Pirinç Elektrot	80,422 $\Omega$ m	140,212 HV

## 2.2. EEİ İşlem Deneyleri

Deneyler, Tablo 3'te verilen parametreler ile Şekil 4'de görülen ticari CNC Elektro Erozyon Makinesi (OSCAREDM Co.Ltd., Taichung, Tayvan tarafından üretilen Model OSCARMAX) üzerinde gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 3.** Deney parametreleri ve seviyeleri

Deney Parametreleri	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Elektrot malzemesi	Pirinç	Kriyojenik pirinç	--
Boşalım akımı (Ip)	1 Amp	1,5 Amp	2 Amp
Vurum süresi (Ton)	10 $\mu$ s	20 $\mu$ s	30 $\mu$ s
Bekleme süresi (Toff)	10 $\mu$ s	20 $\mu$ s	30 $\mu$ s
Boşluk voltaj (Vg)	2 V	4 V	6 V
Polarite	Elektrot (+), İşparçası (-)		
Dielektrik sıvısı	Parafinol 5		
Püskürtme Basıncı (P)	0,5 bar		



**Şekil 4.** EEİ tezgahı ve deneysel kurulum

Çalışmada, elektrot malzemesi (EM); pirinç elektrot (PE), kriyojenik pirinç elektrot (KPE) olmak üzere iki seviyede değişirken, kontrol edilebilir tezgah parametreleri; Ip, Ton, Toff ve Vg üç seviyede değiştirilmiştir. Karma iki ve üç seviye tasarıma sahip olduğumuzdan, deneyleri tasarlamak için Tablo 4'de görüldüğü gibi beş sütun ve on sekiz sıra içeren Taguchi L<sub>18</sub> (2<sup>1</sup> × 3<sup>4</sup>) ortogonal dizi kullanılmıştır.

**Tablo 4.**  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^4$ ) ortogonal deney tasarımı ve ölçüm sonuçları.

Deney No	EM	Ip (A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)	Tekrar Katılan Katman Kalınlığı (mm)	Malzeme Kaldırma Oranı (mm <sup>3</sup> /dk)	Koniklik Açısı (°)
1	PE	1	10	10	2	0,074	0,039	0,4333
2	PE	1	20	20	4	0,039	0,066	0,6360
3	PE	1	30	30	6	0,049	0,123	0,6922
4	PE	1,5	10	10	4	0,123	0,088	0,1933
5	PE	1,5	20	20	6	0,420	0,090	1,0794
6	PE	1,5	30	30	2	0,069	0,209	0,7994
7	PE	2	10	20	2	0,741	0,033	0,3194
8	PE	2	20	30	4	0,712	0,105	1,3300
9	PE	2	30	10	6	1,548	0,541	1,5047
10	KPE	1	10	30	6	0,045	0,064	0,2647
11	KPE	1	20	10	2	0,253	0,112	0,2719
12	KPE	1	30	20	4	0,560	0,153	0,4712
13	KPE	1,5	10	20	6	0,024	0,122	0,4001
14	KPE	1,5	20	30	2	0,595	0,153	0,2814
15	KPE	1,5	30	10	4	0,334	0,182	1,1472
16	KPE	2	10	30	4	0,068	0,252	0,6852
17	KPE	2	20	10	6	0,253	0,356	1,0612
18	KPE	2	30	20	2	0,017	0,403	1,3960

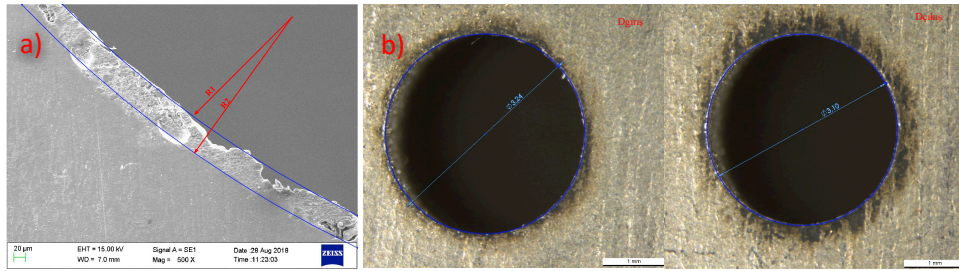
### 2.3. Performans özelliklerinin ölçülmesi

Malzeme kaldırma oranı değerleri, Denver Instrument (SI-203) marka 0,0001 g hassasiyetli bir terazi kullanılarak her bir delme işlemi sonrası malzemede oluşan kütle kaybı tartılarak eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır [29].

$$\text{Malzeme Kaldırma Oranı} = \frac{(G_a - G_b)}{\rho \times t} \text{ mm}^3 / \text{dk} \quad (1)$$

Burada  $G_a$  iş parçasının EEİ işleminden önceki kütlesi, (g);  $G_b$  EEİ işleminden sonraki kütlesi, (g);  $\rho$ , Ti6Al4V alaşımının yoğunluğu, (g/mm<sup>3</sup>);  $t$  ise işleme süresini (dak) ifade etmektedir.

Tekrar katılan katman kalınlığı ölçümleri dijital ortamda piksel boyutunda büyütme imkanı elde edilebildiği için numunelere ait SEM görüntüleri ölçek değiştirilmeden Solidworks 2015 programına taşındı. Program ara yüzü kullanılarak delik görüntüleri büyütülüp daha hassas bir çap ölçümü gerçekleştirildi ve Şekil 5 a'da görüldüğü gibi çap farkına bağlı hesaplamalar yapılmıştır.



**Şekil 5.** a) Tekrar katılan katman kalınlığı ölçümü, b) delik koniklik açısı ölçümü.

Delik giriş ve çıkışları Stereo Zoom Mikroskop (Trinoküler) yardımıyla görüntüldü. Elde edilen görüntüler üzerinde Şekil 5. b'de görüldüğü gibi giriş ve çıkış çap değerleri ( $D_{giris}$ ,  $D_{cikis}$ ) ölçümü yapıldıktan sonra parça kalınlığına bağlı (H) Formül 2 [30] yardımıyla bütün deliklere ait koniklik açısı hesaplandı.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{D_{giris} - D_{cikis}}{2H} \right) \quad (2)$$

### 3. Bulgular

#### 3.1. İşleme Parametreleri ve Çıktıların Taguchi Yöntemi ile Değerlendirilmesi

Taguchi yöntemi, her türlü işleme prosesi altında işlem parametrelerini optimize etmek için en etkili istatistiksel araçlardan biridir. Taguchi tasarımında kullanılan iki önemli araç ortogonal diziler ve sinyal-gürültü (S/N) oranlarıdır. Bu çalışmada, MİNİTAB 19 İstatistiksel Yazılım programı kullanılarak her kontrol faktörünün birbirinden bağımsız olduğu ve her bir faktörün farklı sayıda seviyeleri göz önüne alınarak, Taguchi Mix L<sub>18</sub> (2<sup>1</sup> × 3<sup>4</sup>) ortogonal deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ortogonal diziler araştırmacıların veya tasarımcıların birçok tasarım parametresini aynı anda incelemesine olanak tanır ve diğer faktörlerden bağımsız olarak her faktörün etkilerini tahmin etmek için kullanılabilir. Bu nedenle tasarım parametrelerine ilişkin bilgiler minimum zaman ve kaynakla elde edilebilir. Sinyal-gürültü oranı, belirli bir tasarım parametresinin değiştirilmesinin işlem performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilebileceği bir kalite göstergesidir.

Taguchi metodolojisinde üç tür kalite özelliği vardır; daha küçük daha iyi, daha büyük daha iyi ve nominal en iyi. Bu çalışmada, EE işleminde (a) maksimum Malzeme Kaldırma Oranını (b) minimum Tekrar Katılaştıran Katman Kalınlığını ve Koniklik Açısını elde etmek için gerekli işleme koşullarını belirlemektir. Bu nedenle, bu çalışmada Eşitlik 3 ve 4'te yer alan kalite özellikleri uygulanmıştır [31].

$$\text{En küçük en iyi: } S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

$$\text{En büyük en iyi: } S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

#### 3.2. Tekrar katılaştıran katman kalınlığı

Tablo 4'de verilen deney sonuçları Taguchi istatistiksel inceleme metodu ile analiz edildiğinde tekrar katılaştıran katman kalınlığı için S/N için yanıt tablosu Tablo 5'de verilmiştir. Tablo 5'de verilen S/N yanıt tablosu değerlendirildiğinde tekrar katılaştıran katman kalınlığı değerleri için en etkili parametre seviyeleri sırası ile A2B3C2D1E3 dir denilebilir.

**Tablo 5.** Tekrar katılaştıran katman kalınlığı için S/N yanıt tablosu

Seviye	EM	Ip(A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)
1	17,89	20,15	21,02	<b>11,74</b>	16,71
2	<b>14,19</b>	15,90	15,93	18,52	<b>14,54</b>
3		<b>12,07</b>		17,86	16,87
Delta	3,70	8,08	9,84	6,79	2,33
Sıralama	4	2	1	3	5

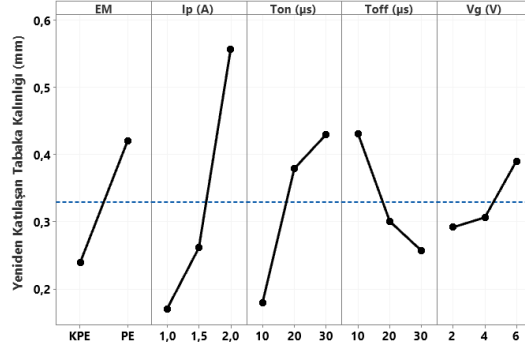
Parametre seviyelerinin optimum kombinasyonlarını doğru bir şekilde değerlendirmek için EEİ parametrelerinin çıktı performansı üzerindeki etkisi varyans (ANOVA) analizi yapılarak elde edilebilir. % 95 güven düzeyinde (α=%5 hata seviyesinde) yapılan ANOVA testi sonucunda elde edilen veriler Tablo 6'da verilmiştir. Burada, her bir parametrenin tekrar katılaştıran katman kalınlığı üzerindeki anlamlılık düzeyini gösteren P değerleri ile serbestlik derecesi, kareler toplamı, kareler ortalaması, F değerleri görülmektedir. ANOVA tablosunda, P < 0,05 ise parametrelerin tekrar katılaştıran katman kalınlığı üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu kabul edilir. Tablo 6 incelendiğinde, Ip (A) nin P değeri 0,05'ten küçük olduğundan bu faktörün tekrar katılaştıran katman kalınlığı üzerinde %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi vardır denilebilir.

**Tablo 6.** Tekrar katılaştıran katman kalınlığı için ANOVA analizi sonuçları

Deney Parametreleri	Serbestlik Derececi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
EM	1	0,274	0,274	0,01	0,929
Ip(A)	2	577,452	288,726	8,93	0,009
Ton(µs)	2	39,497	19,749	0,61	0,566
Toff(µs)	2	74,566	37,283	1,15	0,363
Vg(V)	2	36,311	18,155	0,56	0,591
Hata	8	258,593	32,324		
Toplam	17	986,693			

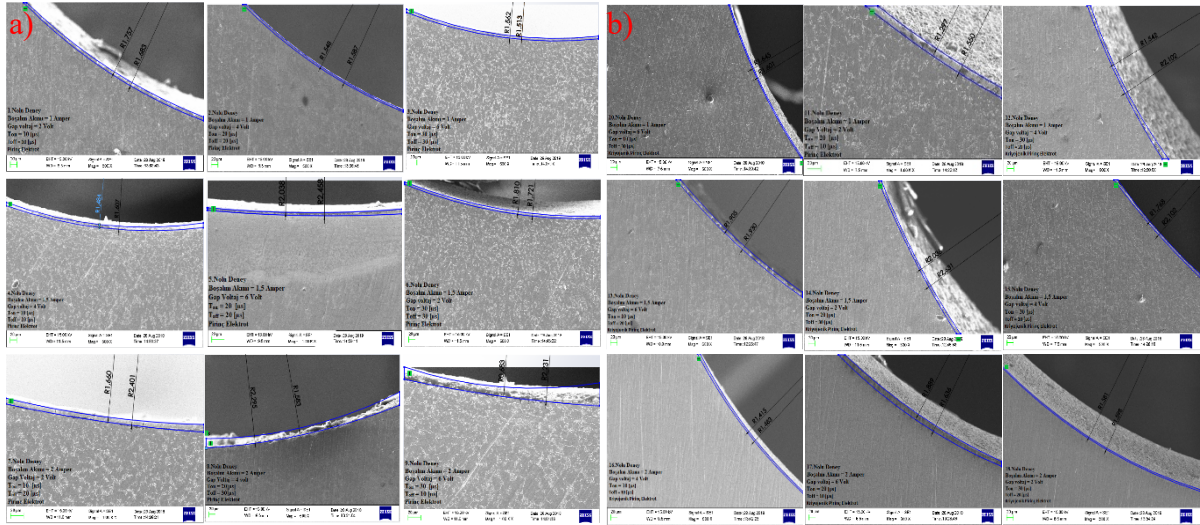


Deneylerde kullanılan her bir işlem parametresinin tekrar katılacak katman kalınlığı üzerindeki etkilerini gösteren grafik Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. İşleme parametrelerinin tekrar katılacak katman kalınlığı üzerindeki etkileri.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, yeniden katılacak tabaka kalınlıkları, ısı işlem görmüş elektrotlara nazaran ısı işlemiz elektrotlarla yapılan işlemler sonunda daha yüksek çıkmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda kriyojenik işlemin malzemede dislokasyonlar, artık gerilmeler gibi olumsuz durumları ortadan kaldırarak metalin termal iletkenliğini artırdığı rapor edilmiştir. Malzemelerin elektriksel iletkenlikleri de Wiedemann-Franz-Lorenz Yasası uyarınca ısı iletkenliklerinde artışa neden olur [32]. Bu durum daha kararlı arkların oluşmasına ve ideal ergimenin oluşmasına yol açar. Basınçlı dielektrik sıvı sayesinde eriyik malzemenin ortamdaki tam anlamıyla uzaklaştırılması ile tekrar katılacak katman kalınlığının azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Tekrar katılacak katman görüntüleri a) pirinç elektrot, b) kriyojenik pirinç elektrot

Ayrıca, tepe akımı, Ton ve Vg nin artışı ile tekrar katılacak katman kalınlığı önemli derecede artmaktadır. Akımdaki artışla, takım-ış parçası ara yüzünde mevcut olan etkin enerji artar ve daha fazla malzeme ergitilir. Ergiyen malzeme hacmine paralel olarak yeniden katılacak tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Yeniden katılacak tabaka kalınlıkları, pirinç elektrotlarla ile işlenmiş yüzeylerde bu aralık 0,029 – 2,102 mm ve kriyojenik pirinç elektrotlarla ile işlenmiş yüzeylerde bu aralık 0,025 – 0,334 mm olan değerler elde edilmiştir. Toff un artmasıyla elektrotların ısı, sıcaklık değerlerinde dielektrik sıvının etkisiyle çok hızlı düşüşler görülmektedir. Buda yeniden katılacak tabakanın istenilen yönde malzemede daha dar bir bölgede ısı etkisinde kalmasına ve tekrar katılacak katman kalınlığında nispeten azalmasına yol açmaktadır. Vg nin artması malzeme üzerinde ısı, sıcaklık artışına

sebeup olmakla beraber akım ve Ton a kıyasla etkisinin az olduğu sonucuna ulaşılabilir. Şekil 7’de deney parametrelerinin tekrar katılma katman kalınlığı üzerindeki etkilerini gösteren TEM görüntüleri verilmiştir.

### 3.2. Malzeme Kaldırma Oranı

Tablo 4’te verilen 18 deney sonucunda ölçülen malzeme kaldırma oranı için en büyük en iyidir kalite kriterine göre S/N oranları hesaplandı. Seviye 1, 2 ve 3’teki her bir parametre için malzeme kaldırma oranının S/N değerleri Tablo 7’de verilmiştir. S/N değerlerinin analizi, malzeme kaldırma oranı için optimum performansın A1B3C3D1E3 parametre seviyeleri ile elde edilebileceğini göstermektedir.

**Tablo 7.** Malzeme kaldırma oranı için S/N yanıt tablosu

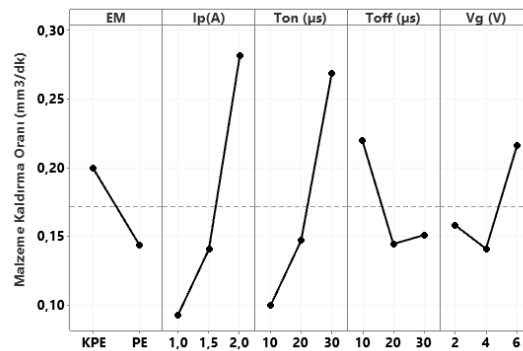
Seviye	EM	Ip(A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)
1	-15,27	-21,53	-22,17	-16,24	-19,10
2	-20,02	-17,50	-18,07	-19,44	-17,90
3		-13,90	-12,69	-17,25	-15,93
Delta	4,75	7,63	9,48	3,20	3,17
Sıralama	3	2	1	4	5

Tercih edilen performans özelliklerine ilişkin ANOVA analizi Tablo 8’de gösterilmektedir. Analizden, EM’nin malzeme kaldırma oranı için önemli işlem değişkeni olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 8.** Malzeme kaldırma oranı için ANOVA analizi sonuçları

Deney Parametreleri	Serbestlik Dereceleri	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
EM	1	52,551	52,5512	10,48	0,012
Ip(A)	2	9,371	4,6854	0,93	0,432
Ton(µs)	2	1,709	0,8546	0,17	0,846
Toff(µs)	2	9,469	4,7345	0,94	0,429
Vg(V)	2	14,152	7,0761	1,41	0,299
Hata	8	40,134	5,0168		
Toplam	17	127,387			

Şekil 8’de işlem parametrelerinin malzeme kaldırma oranına etkilerini gösteren grafik verilmiştir. Grafikler incelendiğinde, kriyojenik işlem görmüş elektrotlar ile birim zamanda daha fazla malzeme kaldırıldığı görülmektedir. Kriyojenik işlem sonrasında, elektrot malzemesinin elektriksel ve termal iletkenliği arttığı birçok çalışmada bildirilmiştir, Kalsi vd. [33], kriyojenik işlem sonucunda, elektrot malzemesinde termal iletkenlikteki artışın takım malzemelerinin ısı yayma kapasitesini artırdığını bildirmişlerdir. Kriyojenik işlem takımında meydana gelecek aşırı ısınmayı azaltırken iş parçasına ısı iletimini artırır ve nispeten daha yüksek malzeme kaldırma oranı elde edilir. Malzeme kaldırma oranının akım ve darbe açık süresindeki artışla arttığı görülmektedir. İşleme alanında mevcut olan etkili kıvılcım enerjisinin Ip ve Ton ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Yüksek akım seviyesinde enerji seviyesi yüksektir ve kıvılcım boşalması fazladır. Bu durum, iş malzemesinin erimesini ve buharlaşmasını artırarak birim zamanda malzeme kaldırma oranının artırdığı söylenebilir [34].



**Şekil 8.** İşleme parametrelerinin malzeme kaldırma oranı üzerindeki etkileri.

### 3.3. Koniklik Açısı

Delik koniklik açısı, "daha düşük, daha iyi" tipi bir kalite özelliğidir. Bu nedenle, S/N oranını hesaplamak için En küçük en iyi yanıt türü kullanıldı ve her parametrenin her seviyesi için koniklik açısının S/N değerleri hesaplanmış ve Tablo 9'da verilmiştir. S/N oranının analizi, koniklik açısı için optimum performansın A2B3C3D2E3 parametre seviyeleri ile elde edileceğini ortaya koymaktadır.

**Tablo 9.** Koniklik açısı için S/N yanıt tablosu

Seviye	EM	Ip(A)	Ton (µs)	Toff (µs)	Vg (V)
1	5,2267	7,2972	9,0397	4,5989	6,4250
2	<b>3,7594</b>	5,5556	3,7666	<b>4,1292</b>	4,0593
3		<b>0,6262</b>	<b>0,6727</b>	4,7509	<b>2,9947</b>
Delta	1,4673	6,6710	8,3669	0,6216	3,4303
Sıralama	4	2	1	5	3

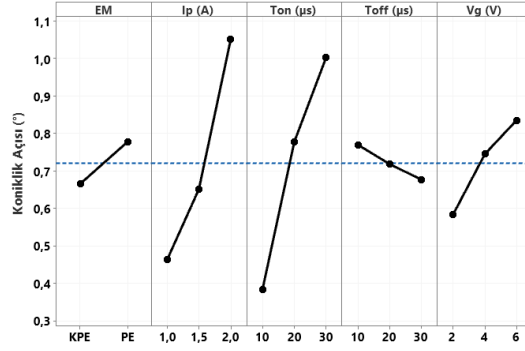
Koniklik açısı'nın S/N verilerine ilişkin ANOVA sonucu Tablo 10'da verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi  $P < 0,05$  şartını sağlayan Ip (A) ve Ton(µs) parametreleri Koniklik açısı üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir denilebilir.

**Tablo 10.** Koniklik açısı için ANOVA analizi sonuçları

Deney Parametreleri	Serbestlik Dereceleri	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	P-Değeri
EM	1	0,0829	0,0829	0,05	0,827
Ip(A)	2	47,6795	23,8398	14,69	0,002
Ton(µs)	2	27,7637	13,8819	8,56	0,010
Toff(µs)	2	1,5462	0,7731	0,48	0,637
Vg(V)	2	9,5320	4,7660	2,94	0,111
Hata	8	12,9796	1,6224		
Toplam	17	99,5840			

EEI' de takım aşınması, işlenmiş parçaların boyut ve şekil hassasiyetini olumsuz etkileyen önemli bir sorundur. Delikte meydana gelen koniklik, işlem süresince takım ucunda meydana gelen aşınmaya bağlı oluşmaktadır. Şekil 9'daki grafikler incelendiğinde farklı işlem parametreleri ile Ti6Al4V malzemesine pirinç elektrotla açılan deliklerin koniklik açısı kriyojenik pirinç elektrotla açılan deliklere nazaran daha yüksek olduğu görülmektedir. Kriyojenik işlem, malzemenin kristal yapısının homojenliğini artırarak, boşlukları ve dislokasyonları çözer ve böylece malzemenin elektrik direncini arttırdığı söylenebilir. Malzemelerin elektriksel iletkenliklerindeki artışlar da termal iletkenliklerde artışa neden olur. Termal iletkenlikteki artışın takım malzemelerinin ısı yayma kapasitesini artırır ve böylece takım sıcaklığı düşer ve sonuç olarak takım aşınmasının yavaşladığı düşünülmektedir [11]. Aşınmanın az olduğu kriyojenik işlem görmüş takımlarla daha dik delikler elde edilmiştir.

Pirinç elektrotla işleme hızına en fazla etki eden parametre olan akımın, pirinç elektrotta daha fazla malzeme kopardığının göstergesi olarak kabul edilebilir. Dolayısı ile kriyojenik pirinç elektrotun ısıl ve elektriksel iletkenliğinin pirinç elektrot göre daha yüksek olması, koniklik miktarı oranın daha düşük çıkmasına neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 9'deki grafikler incelendiğinde koniklik miktarı oranı, akım ve vurum süresi ve boşluk voltaj değerlerine paralel artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 9. İşleme parametrelerinin koniklik açısı üzerindeki etkileri.

Tablo 4 ve Şekil 9’da elde edilen veriler ışığında pirinç elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda, en küçük koniklik miktarı 1 no’lu deneyde (1 A boşalım akımı, 10 µs Ton, 10 µs Toff ve 2 V Vg değerlerinde) 0,4333° ölçülmüş. En büyük koniklik miktarı ise 9 no’lu deneyde (2 A boşalım akımı, 30 µs Ton, 18 µs Toff ve 6 V Vg değerlerinde) 1,5047° ölçülmüştür. Kriyojenik pirinç elektrotlar ile yapılan deneyler sonucunda en küçük koniklik miktarı 10 no’lu deneyde elde edilirken, en büyük koniklik miktarı ise 18 no’lu deneyde (2 A boşalım akımı, 30 µs Ton, 20 µs Toff ve 2 V Vg değerlerinde) elde edilmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada EEİ tezgâhında kullanılan pirinç elektrot malzemesine uygulanan Kriyojenik işlem sonucunda takımın işleme performansı araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında pirinç elektrot’ a uygulanan Kriyojenik ısıl işlemin takımın performansını arttırdığı tespit edilmiştir. Isıl işlemsiz pirinç elektrotların elektrik iletkenlik ve mikrosertlik değerlerinin kriyojenik işlem sonucunda arttığı belirlenmiştir. Bu durum, EEİ tezgahlarında çok önemli bir takım malzeme parametresi olan ısıl ve elektriksel iletkenlik değerinin iyileşmesi ile daha üstün bir işleme performansının elde edilmesini sağladığı söylenebilir. Ek olarak Ip (A) nin tekrar katılacak katman kalınlığı üzerinde, EM’nin malzeme kaldırma oranı üzerinde ve Ip (A) ve Ton(µs) parametrelerinin de koniklik açısı üzerinde %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip olduğu yapılan ANOVA testleri sonucunda tespit edilmiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, FÜBAP TEKF.17.11 numaralı proje kapsamında desteklenen, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Doç. Dr. Mustafa AY danışmanlığında, Savaş APAK tarafından hazırlanmış yüksek lisans tezinden üretilmiştir. SA, deney tasarımının ve deneylerin yapılması, verilerin elde edilmesi, verilerin analiz edilmesi ile sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması. MA, çalışma konusunun belirlenmesi, fikir sahibi, kontrol, tez danışmanı ve sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılması.

#### Kaynaklar

- [1] Ay M, Yücelişi F. Ti-6Al-4V Alaşımının Fiber Lazer ile Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin Araştırılması. Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi 2018; 30 (2): 215-223
- [2] Hasçalık A, Caydas U. A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V alloy machined by EDM and AECG. Journal of Materials Processing Technology 2007;190: 173–180. Doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.02.048
- [3] Jafferson JM, Hariharan P. Machining Performance of Cryogenically Treated Electrodes in Microelectric Discharge Machining: A Comparative Experimental Study, Materials and Manufacturing Processes 2013; 28: 397–402. Doi: 10.1080/10426914.2013.763955
- [4] Bhaduri, D, Kuar AS, Sarkar S, Biswa SK, Mitra S. Electro discharge machining of titanium nitride-aluminium oxide composite for optimum process criteria yield. Materials and Manufacturing Processes 2009; 24: 1312–1320.
- [5] Seo YW, Kim D, Ramulu M. Electrical discharge machining of functionally graded 15–35 vol% SiCp/Al Composites. Materials and Manufacturing Processes 2006; 21 (5): 479–487. Doi: 10.1080/10426910500471482

- [6] Chakravorty R, Kumar Gauri S, Chakraborty S. Optimization of correlated responses of EDM process. *Materials and Manufacturing Processes* 2012; 27: 337–347. Doi: 10.1080/10426914.2011.577875
- [7] Rajurkar KP, Yu ZY. 3D micro-EDM using CAD/CAM. *CIRP Annals–Manufacturing Technology* 2000; 49(1): 127-130. Doi:10.1016/S0007-8506(07)62911-4
- [8] Pandey A, Singh S. Current research trends in variants of Electrical Discharge Machining: A review. *International Journal of Engineering Science and Technology* 2010; 2(6): 2172–2191
- [9] Medellin HI, DeLange DF, Morales J, Flores A. Experimental study on electro discharge machining in water of D2 tool steel using two different lectrode materials. *Proc.Inst.Mech.Eng.,PartB:J.Eng.Manuf* 2009; 223(11): 1423–1430. Doi:10.1243/09544054JEM1573
- [10] Yan BH, Tsai HC, Huang FY. The effect in EDM of a dielectric of aurea solution in water on modifying the surface of titanium. *Int. J. Mach.Tools Manuf* 2005; 45: 194–200. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.07.006
- [11] Chow HM, Yan BH, Huang FY, Hung JC. Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of Titanium alloy using electro-discharge machining. *J.Mater.Process Technol* 2000;101: 95–103. Doi:10.1016/S0924-0136(99)00458-6
- [12] Altuntaş G, Kaplan ÖF, Bostan B. Investigation of the Effect of Tempering and Cryogenic Treatment on Mechanical Properties of Boron Steels. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 2023; 11(2): 300-308. Doi: 10.29109/gujsc.1271368
- [13] Reitz W, Pendray J. Cryo-processing of materials: A review of current status, *Journal of materials and Manufacturing process* 2001; 16(6): 829-840. Doi:10.1081/AMP-100108702
- [14] Altuntaş G, Altuntaş O, Bostan B. Evaluation of the Effect of Shallow Cryogenic Treatment on Tribological Properties and Microstructure of High Manganese Steel. *International Journal of Metalcasting* 2023; 1-12. Doi: 10.1007/s40962-023-01131-5
- [15] Altuntaş, G., Özdemir, A. T., & Bostan, B. A survey of the effect of cryogenic treatment and natural ageing on structural changes and second-phase precipitation in Al–Zn–Mg–Cu alloy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2023; 148(20):10713-10725. Doi:10.1007/s10973-023-12414-8
- [16] Zhirafar S, Rezaeian A, Pugh M. Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel. *J. Mater. Process. Technol* 2007; 186 (1): 298– 303. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.12.046
- [17] Yong AYL, Seah KHW, Rahman M. Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2006; 46(15): 2051–2056. Doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.01.002
- [18] Seah KHW, Rahman M, Yong KH. Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide cutting tool inserts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B–Journal of Engineering Manufacture* 217 (1) (2003) 29–43. Doi:10.1243/095440503762502260
- [19] Nalbant M, Yıldız Y. Effect of cryogenic cooling in milling process of AISI 304 stainless steel, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 2011; 21(1): 72-79. Doi:10.1016/S1003-6326(11)60680-8
- [20] Sing A, Grover NK. Wear Properties of Cryogenic Treated Electrodes on Machining Of En-31. *Materials Today: Proceedings* 22015; 2: 1406 – 1413. Doi:10.1016/j.matpr.2015.07.060
- [21] Kumar A, Maheshwari S, Sharma C, Beri N. Machining Efficiency Evaluation of Cryogenically Treated Copper Electrode in Additive Mixed EDM. *Materials and Manufacturing Processes* 2012; 27(10): 1051–1058. Doi:10.1080/10426914.2011.654151
- [22] Jafferson JM, Hariharan P, Machining performance of cryogenically treated electrodes in micro electric discharge machining: a comparative study. *Mater Manuf. Process* 2013; 28(4): 397–402. Doi:10.1080/10426914.2013.763955
- [23] Gill SS, Singh J. Effect of deep cryogenic treatment on machinability of titanium alloy (Ti-6246) in electric discharge drilling, *Mater. Manuf. Process* 2010; 25(6): 378–385. Doi:10.1080/10426910903179914
- [24] Yıldız Y, Sundaram MM, Rajurkar KP, Nalban M. The Effects of Cold and Cryogenic Treatments on the Machinability of Beryllium-Copper Alloy in Electro Discharge Machining. *Proceedings of 44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*; 1-3 June 2011; Madison, Wisconsin, USA.
- [25] Naveed A, Kashif I, Khaja M, Rafaqat A, Naif AS. Machinability of titanium alloy through electric discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes* 2019; 34 (1): 93-102 Doi: 0.1080/10426914.2018.1532092
- [26] S. Dhanabalan, K. Sivakumar, C. Sathya Narayanan. *Journal of Engineering Science and Technology* 2015; 10 (1): 72-80
- [27] Kumar S, Batish A, Sing, Singh T P. A hybrid Taguchi-artificial neural network approach to predict surface roughness during electric discharge machining of titanium alloys. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2014; 28: 2831-2844.
- [28] Datta S, Biswal BB, Mahapatra SS. Electrical discharge machining of Inconel 825 using cryogenically treated copper electrode: emphasis on surface integrity and metallurgical characteristics. *Journal of Manufacturing Processes* 2017; 26: 188-202.

- [29] Govindan P, Joshi Suhas S. Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2010; 50.5: 431-443. Doi: 10.1016/j.ijmachtools.2010.02.004
- [30] Dave HK, Mathai VJ, Desai KP, Raval HK. Studies on quality of microholes generated on Al 1100 using micro-electro-discharge machining process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2015, 76: 127-140. Doi: 10.1007/s00170-013-5542-4
- [31] Kalyon A. Elektro Erozyon ile İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü ve İş Parçası İşleme Hızının Alüminyum Alaşımı İçin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 2019; 21(62): 595-605. Doi:10.21205/deufmd.2019216223
- [32] Isaak CJ, Reitz W. The effects of cryogenic treatment on the thermal conductivity of GRCo-84. *Mater Manuf Processes* 2008;23(1):82–91. Doi:10.1080/10426910701524626
- [33] Kalsi NS, Sehgal R, Sharma VS. Cryogenic treatment of tool materials: a review. *Mater Manuf Processes* 2010; 25(10): 1077–100. Doi:10.1080/10426911003720862
- [34] Manivannan R, Kumar MP. Multi-response optimization of Micro-EDM process parameters on AISI304 steel using TOPSIS. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2016; 30 (1): 137-144. Doi: 10.1007/s12206-015-1217-4

## Modeling Longitudinal Evolution of Decommissioned Geostationary Satellites using Neural Networks

İbrahim ÖZ<sup>1\*</sup>, Cevat ÖZARPA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, TTO, Ayvalı Mah. Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Ankara Medipol Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, Türkiye

\*1 [ibrahimoz@gazi.edu.tr](mailto:ibrahimoz@gazi.edu.tr), <sup>2</sup> [cevat.oraropa@ankaramedipol.edu.tr](mailto:cevat.oraropa@ankaramedipol.edu.tr)

(Geliş/Received: 09/01/2024;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Abstract:** This study uses neural networks to explore the intricate longitudinal progression of decommissioned geostationary satellites. The goal is to model and predict satellites' longitudinal dynamics across time dimensions. Historical satellite longitude data undergoes thorough preprocessing to train time series neural networks in both single-input and 3-input configurations for all six decommissioned satellites, yielding comprehensive longitudinal behavior insights. Results reveal impressive outcomes: average Mean Squared Error (MSE) between predicted and measured longitudes is  $1.55 \times 10^{-3}$ , with regression close to unity. This convergence implies a strong alignment between the neural network methodology employed and the intricate problem domain. These results accentuate the suitability and effectiveness of the chosen neural network approach in addressing the challenges posed by decommissioned geostationary satellite trajectory modeling. The study's implications span various fields. Insight into long-term orbital shifts aids in understanding satellite behaviors, enhancing trajectory predictions and decision-making in satellite management and space technology advancement. Additionally the research emphasizes the importance of accurate predictions about satellite behavior after decommissioning. This contributes to better mission planning, resource optimization, and more efficient strategies for dealing with space debris.

**Key words:** Decommissioned satellites, geostationary orbits, neural networks, longitudinal evolution, orbit dynamics.

### Ömrünü Tamamlamış Yer Sabit Uyduların Boylam Hareketlerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi

**Öz:** Bu çalışmada, yapay sinir ağları kullanılarak işletme ömrünü tamamlamış yer sabit yörünge uydularının boylam hareketleri incelenmiştir. Uydu yörünge hareketleri ve dinamiği içinde, uydu boylam hareketleri yapay sinir ağları ile modellenmiştir. Ömrünü tamamlamış altı uyduya ait veriler, veri tabanından alınmış, kapsamlı bir ön işleme tabi tutulmuş ve hem tek girişli hem üç girişli yapay sinir ağı eğitiminde kullanılmıştır. Modelleme sonunda ölçülen ve tahmin edilen sonuçlar arasındaki ortalama kare hata (MSE)  $1.55 \times 10^{-3}$  ve regresyon değeri 1 civarında olup tüm uydular için oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Böylece yapay sinir ağları ile karmaşık yörünge dinamiğinin modellenebildiği görülmüştür. İşletme ömrünü tamamlamış uyduların boylam hareketlerinin yapay sinir ağları ile etkili bir biçimde modellenebildiği görülmektedir. Uydu operatörleri bu tip uyduların uzun vadeli yörünge hareketlerini önerilen yöntem ile tahmin edebilir ve tahminlerini bu konuda alacakları kararlar için destek bilgisi olarak kullanabilir. İlave olarak bu araştırma ömrünü tamamlamış uyduların hareketlerini hassas bir şekilde göstermekte bu durumda daha iyi görev planlaması yapmaya, kaynak optimizasyonuna ve uzay enkazlarının daha iyi yönetilme stratejilerinin geliştirilmesine imkân tanımaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Ömrünü tamamlamış uydu, yer sabit yörünge, yapay sinir ağları, boylam değişimi, yörünge dinamiği.

#### 1. Introduction

Fırat Geostationary satellites gracefully encircle the earth at an unwavering 35,786 km altitude above the equator. This exceptional orbital position, synchronized with the earth's rotation, facilitates straightforward ground-based tracking. The stability of this position proves invaluable for television, data communication, and other applications that benefit from consistent connectivity. The 24-hour orbital period ensures uninterrupted communication, allowing antennas to remain aligned with GEO satellites, transmitting and receiving signals without needing constant adjustments [1-2].

The orbit raising of a geostationary satellite's operational life is marked by the exhaustion of its onboard fuel reserves. At this critical juncture, the satellite's maneuverability is significantly compromised, and its ability to perform controlled orbital adjustments diminishes. Consequently, a carefully orchestrated decommissioning process is initiated to manage the satellite's fate and ensure the long-term sustainability of the space environment.

\* Sorumlu yazar: [ibrahimoz@gazi.edu.tr](mailto:ibrahimoz@gazi.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4593-917X, <sup>2</sup> 0000-0002-1195-2344

The International Telecommunication Union (ITU), a specialized agency of the United Nations, plays a pivotal role in space communication governance. ITU's Radio Regulations (RR) provide a framework for managing orbital slots and frequency assignments, ensuring interference-free communication services. The regulation Rec. ITU-R S.1003 of the ITU R pertains to the disposal of space systems, particularly geostationary satellites, once they cease their operational activities due to fuel depletion or other reasons. According to this regulation, satellite operators are mandated to remove their satellites from the geostationary orbit at the end of their mission [3-4].

Similarly, The Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC) advises measures to mitigate space debris, including preventing break-ups, relocating spacecraft and orbital stages after missions, and limiting object releases. For geostationary satellites at the end of their operational life, recommendations include relocating them from the crowded geostationary orbit region and passivating them to reduce explosion risks, though this passivation can influence their orbital characteristics. These steps collectively aim to reduce debris and uphold space environment sustainability [5-6].

Geostationary satellites (GEO satellites) are typically decommissioned within the range of 150 km to 500 km above the geostationary belt. Once a decommissioned satellite is placed in its new graveyard orbit, its orbital behavior is influenced by several factors, including the earth's gravitational pull, solar wind, and gravitational forces from other celestial bodies. These perturbations introduce variations in the satellite's orbital elements over time, which can be categorized into three main types: short-periodic, long-periodic, and secular terms. Short-periodic variations terms of a satellite impact elements like semi-major axis, eccentricity, inclination, ascending node, and argument of perigee. They arise from perturbations with periods less than one year, including earth's non-spherical mass distribution, the moon's and Sun's gravitational effects, and solar radiation pressure. These variations can lead to daily or monthly changes in orbital elements. Long-periodic variations affect the same orbital elements, arising from perturbations with periods exceeding one year, such as the gravitational influence of the moon and Sun and solar radiation pressure. These variations cause changes on a yearly or multi-year basis.

In the realm of artificial intelligence (AI) and machine learning (ML), a plethora of methodologies and applications have emerged, showcasing the immense potential and versatility of these technologies. Methodologically, AI and ML encompass a wide spectrum of techniques, including feature selection and stability analysis [7], hybrid control systems involving artificial neural networks (ANNs) and fuzzy PI control [8], and comparative assessments of predictive algorithms, such as ordinary ANNs and convolutional neural networks (CNNs) for customer churn prediction [9]. These methods collectively form the foundation for addressing complex challenges across diverse domains.

When it comes to real-world AI applications, the breadth of possibilities is striking. AI-driven techniques play a pivotal role in forecasting Turkey's natural gas consumption [10], utilizing LSTM-based deep learning methods for earthquake prediction through ionospheric data analysis [11], and improving the precision of daily wind energy predictions through machine learning and statistical techniques [12]. In the healthcare sector, AI comes to the forefront with a machine learning model for diagnosing Type 2 diabetes based on health behavior [13], while in the field of speech recognition, recurrent units like LSTM and GRU find applications in Turkish speech recognition techniques and broader speech processing endeavors [14]. These references represent just a glimpse of the rich tapestry of AI and ML methodologies and applications, each contributing uniquely to their respective domains and expanding the horizons of technological possibilities.

This study focuses on the longitudinal behavior of decommissioned GEO satellites with machine learning over time. Due to the tumbling motion of deorbited GEO satellites, accurately determining their sunlit surface area and surface reflection coefficient proves challenging. Additionally, the dynamic modeling of GEO satellites is complex due to the presence of various perturbing forces [15].

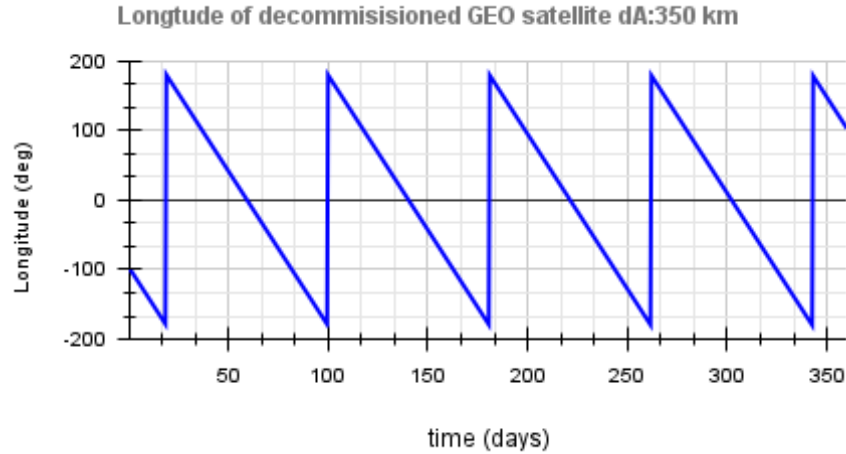
## 2. Satellite Dynamics in GEO Graveyard Region

Decommissioned satellites exhibit a specific movement known as "drift" in an eastward direction when transitioning to the graveyard orbit. The eastward drift of decommissioned GEO satellites is influenced by a combination of factors, primarily the gravitational perturbations caused by the non-spherical mass distribution of the earth, gravitational forces from the moon and Sun, and solar radiation pressure. While these satellites were initially positioned in a geostationary orbit where their orbital period matched the earth's rotation period, their relocation to the graveyard orbit changes their orbital parameters. [16]

The eastward drift occurs due to the interaction of these perturbing forces. As the satellite moves away from its original geostationary position, the gravitational forces from the moon and Sun and the solar radiation pressure act as external accelerations, causing the satellite's orbit to slowly shift in an eastward direction. This phenomenon can be visualized as the satellite "catching up" with the earth's rotation as it moves along its orbital path. It's important to note that the drift of decommissioned GEO satellites is a natural outcome of the complex interplay



between various gravitational and radiation forces. This phenomenon is well understood and is a critical consideration when planning the end-of-life operations of GEO satellites to ensure their safe disposal and to minimize the risk of collisions with operational satellites in the geostationary region. [17, 18]



**Figure 1.** Decommissioned GEO satellite 350 km above the GEO belt, typical longitude values over a time.

The longitude drift rate (D) is highly related to the semi-major discrepancy ( $\Delta a$ ) relative to the synchronous semi-major axis  $a_s$ , whose value is almost constant subjected to the non-spherical terms of the earth's gravitation field [16].

The daily longitude drift rate can be expressed in Equation 1.

$$D = -\frac{3 n_c}{2 a_c} (a - a_c) \frac{1}{n_c} \frac{86400}{86164.09} 360^\circ = -0.0128^\circ (a - a_c) \tag{1}$$

where D: drift rate $^\circ$ / day, a: semi-major axis,  $a_c$ : ideal GEO semi-major axis,  $n_c = \sqrt{\mu/a_c^3}$

The drift rate is counted positively in the eastward direction. If  $\Delta a=0$ , then  $D=0$ . If  $\Delta a>0$ , then  $D<0$ , which means that the semi-major axis' increment results in that the satellite rotates slowly relative to the spin of the earth. By contrast, the semi-major axis' decrement results in the satellite running faster than the earth's spin. One kilometer of semi-major discrepancy induces a longitude drift rate of 0.0128 per day.

Table 1 presents the altitudes of decommissioned GEO satellites from GEO ideal orbit 35786 km along with their corresponding relative changes in longitude expressed in degrees per day. The table also includes the duration of one complete revolution around the earth for each altitude.

**Table 1.** GEO Decommissioning Altitude and Relative Longitude Change

GEO altitude	GEO+150 km	GEO+200 km	GEO+350 km	GEO+500 km
$\Delta$ Long ( $^\circ$ /day)	-1.92	-2.56	-4.48	-6.40
Revolution Time (days)	187.50	140.63	80.36	56.25

As expected, there is a direct correlation between altitude and the rate of change of longitude per day, with higher altitudes resulting in faster rates of change. Consequently, the time needed a deorbited satellite to complete one full revolution around the earth decreases as its altitude increases. By interpreting these relationships, we can make more accurate orbital predictions and enhance our overall understanding of satellite movements. [19, 20].

### 2.1 Data Collection and Processing

In this comprehensive study, we have extensively investigated the behavior of six decommissioned geostationary satellites, each identified by their NORAD IDs: Eutelsat-33A (NORAD ID: 27948), Intelsat-801 (NORAD ID :24742), Meteosat-6 (NORAD ID: 22912), Astra-1F (NORAD ID: 23842), Turksat-1B (NORAD ID: 23200), and Turksat-2A (NORAD ID: 26666). Our research primarily focused on analyzing the longitudinal evolution and orbit dynamics of these satellites over time.

We sourced the observed orbital parameters from publicly available information on space track databases to gather essential data for our analysis [21]. These datasets were carefully curated, providing precise and accurate information on each satellite's position, velocity, inclination, eccentricity, and other relevant orbital characteristics.

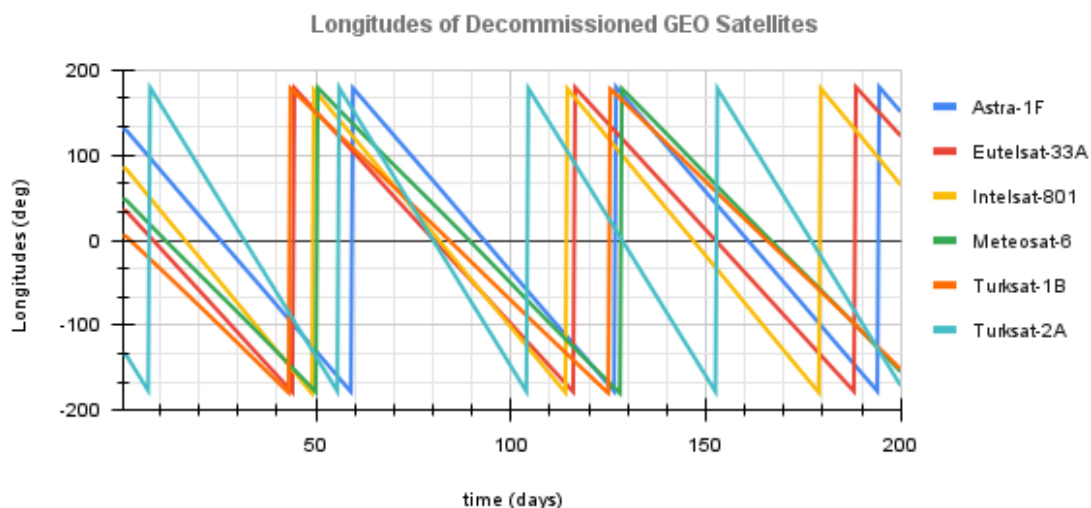
Table 2 provides the initial data of six satellites, obtained from the publicly available Celestrack data source and based on the epoch of January 1<sup>st</sup>, 2020, at 9:00 UTC. The orbital parameters listed in Table 2 offer a comprehensive insight into the initial configurations of these decommissioned satellites. These orbital parameters, including Semi-Major Axis (SMA), Eccentricity (Ecc), Inclination (inc), Right Ascension of Ascending Node (RAAN), Argument of Perigee (AoP), True Anomaly (TA), and Longitude (Lon), provide a foundation for analyzing the orbital dynamics and behaviors of these satellites. Such detailed information is invaluable for studying how these satellites interact with the geostationary region and how various factors influence their trajectories over time.

**Table 2.** The orbital parameters of the six satellites at the designated epoch.

Satellites	SMA	Ecc	inc	RAAN	AoP	TA	Lon
Astra-1F	42585.399	0.001072	7.180	55.865	295.853	14.605	131.309
Eutelsat-33A	42559.163	0.000415	4.418	74.147	189.917	7.313	36.097
Intelsat-801	42602.619	0.001350	8.476	48.262	301.030	331.613	85.710
Meteosat-6	42531.116	0.000370	13.873	18.878	242.078	23.270	48.879
Turksat-1B	42512.006	0.001461	11.492	32.772	33.950	175.002	6.011
Turksat-2A	42754.583	0.001215	3.331	81.888	247.414	133.713	250.428

A comprehensive dataset spanning a period of two years, beginning from the selected epoch, was acquired from the Celestrack database. These data points serve as the foundation for analyzing and modeling the longitudinal behavior of decommissioned geostationary satellites.

Figure 2 offers a graphical representation that emphasizes the positions of decommissioned geostationary satellites, which serve as the primary dataset for the analysis conducted in this study. The figure showcases the longitudinal changes of these satellites, which are expressed in terms of degrees per day. These changes signify the gradual evolution of the satellites' positions along their orbits over time. The data used for this visualization was sourced from the Celestrack database, a reputable repository of orbital information. This dataset, allows us to observe and analyze the patterns of movement exhibited by these satellites during this period. The graphical representation is a valuable tool for visually comprehending the complex orbital dynamics and longitudinal changes these decommissioned satellites undergo in their post-operational phases.



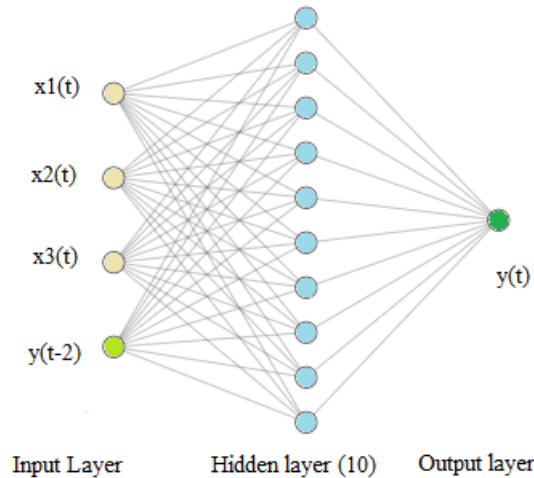
**Figure 2.** Decommissioned geostationary satellites, accompanied by their respective longitudinal changes expressed in degrees per day.

### 3. Neural Network Modeling of Decommissioned Satellites

Various forms of neural networks, deep learning, and artificial intelligence are extensively applied across diverse satellite domains, exemplified by various research efforts. Stepišnik et al. explored the utilization of machine learning to enhance spacecraft operation within dynamic radiation environments [22]. Roberts, Solera, and Linares delved into geosynchronous satellite behavior classification via unsupervised machine learning [23]. Supervised machine learning was applied in geosynchronous satellite maneuver classification and orbital pattern anomaly detection [24]. Solera, Roberts, and Linares addressed the geosynchronous satellite pattern of life node detection and classification, presenting their findings at the 9th Space Traffic Management Conference [25]. Roberts and Linares further contributed to the field by focusing on geosynchronous satellite maneuver classification via supervised machine learning at the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. These studies collectively illustrate the broad spectrum of satellite applications enriched by neural network paradigms and artificial intelligence techniques.

Over time, there has been a consistent rise in interest and exploration within artificial neural networks, marking a significant evolution from the early stages of machine learning. This evolution has given rise to one of the most prevalent subsets of artificial intelligence algorithms known as deep learning architectures. Complementary to these architectures, plethora of innovative approaches have emerged within the realm of deep learning, aiming to tackle and solve an array of complex problems in artificial intelligence. These advancements in intelligent solutions have reverberated across an extensive spectrum of sectors, including but not limited to industry, medicine, robotics, image processing, computer vision, object detection, speech processing and recognition, translation, future prediction, finance, and a myriad of other domains [26-28]. This widespread applicability underscores the significance and breadth of impact that artificial neural networks, particularly within deep learning frameworks, have achieved in modern-day AI applications.

In this study, we have developed a neural network model to predict the longitude of six decommissioned geostationary satellites. The model comprises single-input and three-input layers, with a single output layer dedicated to predicting the longitude. The neural network architecture incorporates ten hidden layers, each containing interconnected neurons, and two time delays as shown in Figure 3. This intricate configuration empowers the network to effectively capture and understand the intricate patterns and intricate relationships between orbital dynamics and the resulting variations in longitude. Through this architecture, the neural network learns to discern the complex interplay of factors affecting the longitudinal behavior of these satellites.



**Figure 3.** Nonlinear autoregressive neural networks with exogenous Input

Assuming  $x(t)$  represent the exogenous input at time  $t$ , and  $y(t)$  be the output of the network at time  $t$ . The network takes into account the historical values of its own output and the exogenous inputs up to the current time to predict the next output. Mathematically, this can be represented through Equation (2),

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-d_y), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-d_x); \theta) \quad (2)$$

where  $d_y$  : is the number of lagged terms considered for the output time series,  $d_x$ : the number of lagged terms considered for the exogenous input time series,  $\theta$ : represents the set of all parameters (weights and biases) in the network

The dynamics of the network can be represented for hidden state by the following Equation (3),

$$h(t) = \sigma(W_{hh}h(t-1) + W_{hx}x(t) + b_h) \quad (3)$$

the output prediction can be expressed with Equation (4),

$$y(t) = W_{yh}h(t) + b_y \quad (4)$$

$W_{hh}$ ,  $W_{hx}$ , and  $W_{yh}$  represent the weight matrices associated with the hidden state transitions, exogenous input transitions, and output generation, respectively.

During training, the network learns the weight matrices  $W_{hh}$ ,  $W_{hx}$ , and  $W_{yh}$ , as well as the bias vectors  $b_h$  and  $b_y$ , through optimization techniques such as gradient descent. The objective is to minimize the difference between the predicted output  $y(t)$  and the actual target output at each time step. The specific choice of activation functions, network architecture (recurrent neural network), and optimization algorithm selected according to datasets and the problem.

By delving into the interplay between past longitude values and the associated input variables, the network becomes proficient in capturing underlying patterns and correlations. This learning process empowers the network to make accurate predictions about future longitudes. Such predictive capabilities are crucial for comprehending the positioning of satellites in space and facilitating informed decision-making processes.

This comprehensive study involves collecting data spanning a total of 1463 samples for each satellite, which is pivotal for facilitating the training of neural networks to achieve predictive capabilities. The dataset is meticulously divided into three distinct segments: 70% (1025 samples) is allocated for the training phase, 15% (219 samples) for validation, and the remaining portion for rigorous testing. During the training process, the neural network undergoes iterative adjustments in response to computed errors, thus refining its predictive performance. The validation subset evaluates the network's generalization capacity, thereby leading to the termination of training when further improvements in performance plateau. Conversely, the testing subset serves as an independent evaluation mechanism, assessing the network's operational efficiency both during and after the training phase. This approach ensures that the network's performance is rigorously assessed while preserving the integrity of the training process.

As previously outlined, the study encompasses two distinct modes of training: a single input paradigm that exclusively involves day values and a more intricate 3-input framework that encompasses day values, semi-major axis, and latitudinal inputs. This dual-training approach allows the neural network to learn from multiple dimensions of data, enhancing its predictive capabilities and enabling a more holistic understanding of the complex interplay between orbital parameters and longitudinal changes.

The gathered dataset is divided into distinct training and validation sets. The neural network is then subjected to training using the allocated training data, during which it learns to predict longitudes based on input data. This learning process takes place iteratively, refining the model's ability to generate accurate predictions.

The Mean Squared Error (MSE) is employed as a pivotal performance indicator to gauge the effectiveness of the proposed model's predictive performance. The utilization of this metric involves quantifying the accuracy and quality of predictions by assessing the dissimilarity between predicted and actual values. The MSE is mathematically expressed as follows;

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{measured} - y_{predicted})^2 \quad (5)$$

The MSE metric incorporates the absolute differences between the actual and predicted values. However, through squaring these differences, the emphasis is placed on larger errors, resulting in an average squared difference between the actual and predicted values.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{measured} - y_{predicted})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{measured})^2} \quad (6)$$

In this research, the Levenberg-Marquardt training algorithm is selected due to its superior performance compared to alternative methods. The training, validation, and testing outcomes assessment relies on two key metrics: Mean Squared Error (MSE) and Regression R Values. The MSE metric quantifies the average squared difference between projected outputs and real targets, with lower values signifying heightened accuracy (zero value indicates no error). The Regression R Values measure the correlation between anticipated outputs and target values, with an R-value of 1 signifying a strong association and a value of 0 denoting a random relationship. By leveraging these evaluation metrics in conjunction with the effective Levenberg-Marquardt training algorithm, our study aims to deliver precise and dependable predictions for estimating the longitude of decommissioned satellites, thereby advancing the capabilities of neural network modeling within this domain.)

#### 4. Results and Discussion

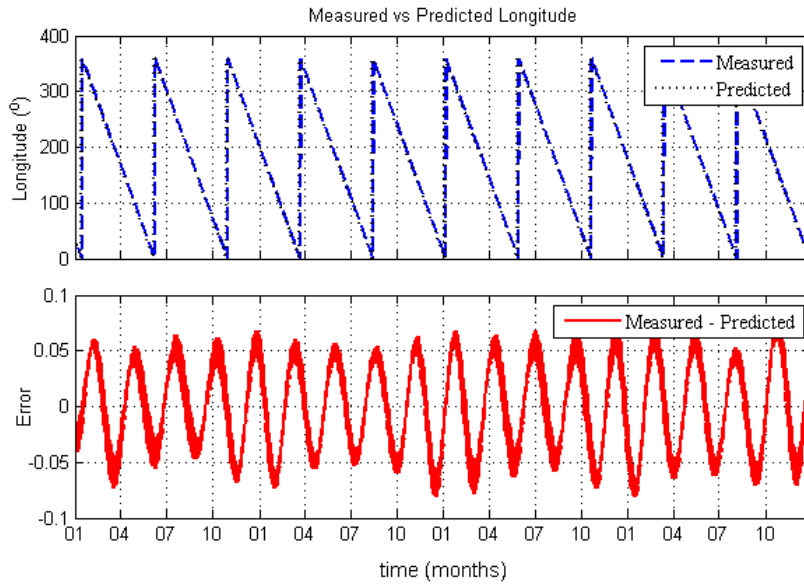
In this study, we delved into the intricate task of modeling the longitudinal evolution of decommissioned geostationary satellites by applying time series neural networks. Our primary objective was to harness neural networks' capabilities to predict these satellites' longitudinal behavior, shedding light on their orbital dynamics and contributing to the advancement of predictive modeling in space science.

Through rigorous data collection and meticulous analysis, we constructed and evaluated a neural network model that effectively captures the complex relationships between past longitudinal values and other relevant orbital parameters. The dataset, spanning 1463 points, was meticulously partitioned into training, validation, and testing subsets, ensuring a robust evaluation of the model's predictive prowess. By employing a 10-layer neural network architecture with interconnected neurons and two delays, we facilitated the network's ability to discern and understand the intricate patterns that govern the longitudinal changes of decommissioned geostationary satellites.

Our investigation encompassed both single-input and 3-input paradigms, wherein we considered the historical data of longitude ( $y$ ) as well as other pertinent factors ( $x$ ), such as semi-major axis and latitude. The neural network successfully learned from these input data to accurately predict the longitude variations over time. The model's effectiveness was assessed using performance metrics, namely Mean Squared Error (MSE) and Regression R Values. Our findings highlighted that the Levenberg-Marquardt training algorithm yielded superior results, underpinning the model's capability to provide reliable and precise predictions.

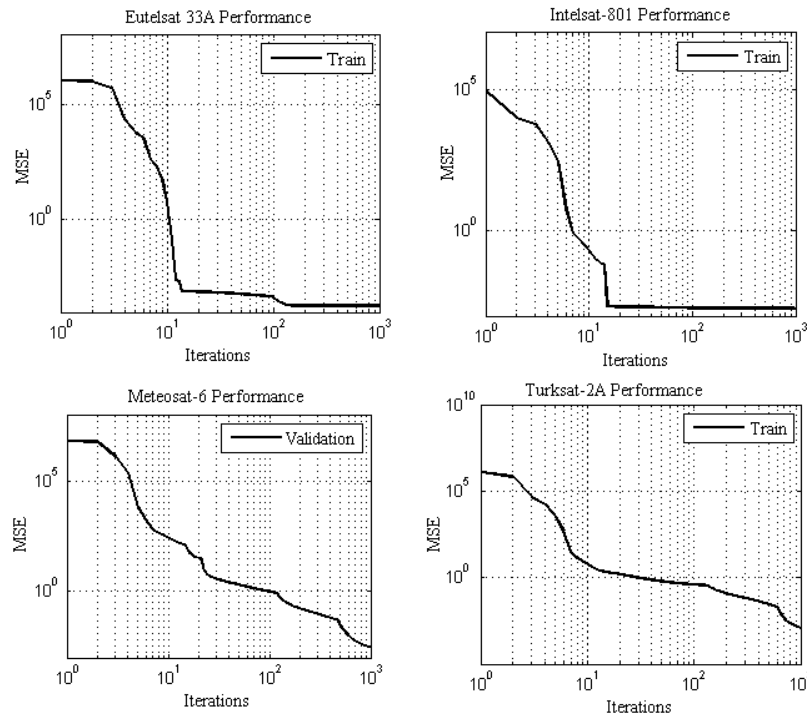
The results from our modeling efforts revealed promising outcomes. The predicted versus measured longitude differences exhibited remarkable accuracy, as evidenced by the low MSE values and regression values of 0.999. This alignment between predictions and actual observations underscores the robustness of our neural network model in capturing the longitudinal evolution of decommissioned geostationary satellites. The model's predictive capability holds significant implications for satellite operators and space agencies, enabling better mission planning, decision-making, and resource allocation during the post-operation phases of satellite lifecycles.

An individual neural network model has been established and trained for each satellite in two distinct scenarios: single-input and three-input cases. The outcomes encompass both predicted longitudes and associated errors, signifying the disparities between the predicted and measured values. Among multiple time response graphs illustrating satellite behavior, particular attention has been given to Eutelsat's results to avoid redundancy. In Figure 4, the graphical representation showcases the alignment of measured and predicted longitude values for Eutelsat-33A. The congruence between the two sets of values is evident, with negligible divergence. The lower segment of the figure exhibits the variance between the two, demonstrating an error fluctuating within the range of  $\pm 0.05$  degrees. This exceptional error magnitude underscores the remarkable performance and accuracy of the neural network modeling employed.



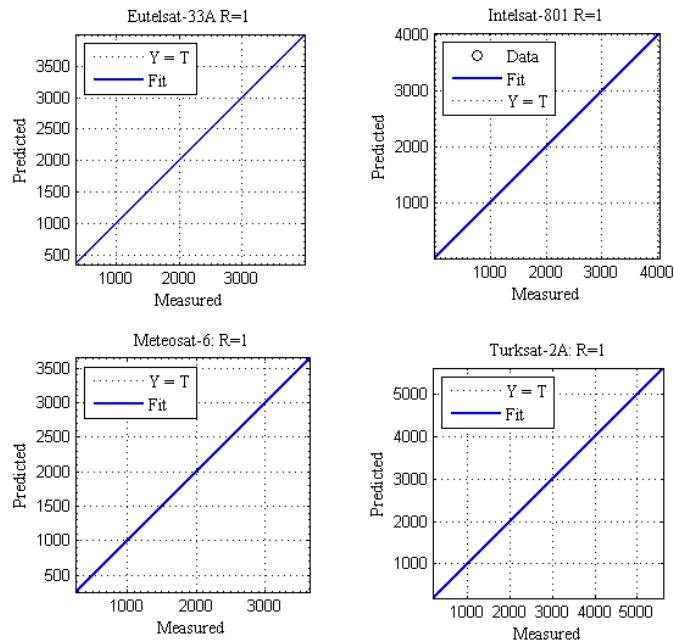
**Figure 4.** Eutelsat-33A: Measured and Predicted Longitude Values (Upper) and Differences (Lower)

Figure 5 offers an insightful representation of the dynamics of Mean Squared Error (MSE) in conjunction with the number of iterations during the iterative modeling procedure. This depiction is presented on a logarithmic scale for four specific satellites: Eutelsat-33A, Intelsat-801, Meteosat-6, and Turksat-2A. As anticipated, the errors consistently diminish as the iterative process advances. This pattern is consistent with the expected trajectory of iterative optimization algorithms commonly employed in neural network training. The gradual decrease in errors across successive iterations signifies the model's iterative refinement of predictions. Through this incremental learning process, the neural network adeptly hones its predictions, leading to a significant reduction in MSE and a heightened precision in estimating longitudes.



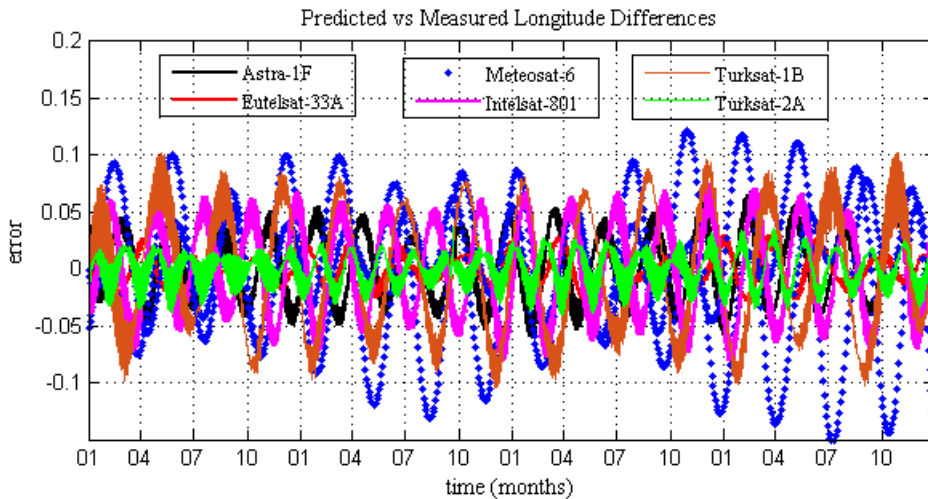
**Figure 5.** Mean Squared Error (MSE) Performance of Neural Network Across Iterations for 4 Satellites

Figure 6 illustrates a comprehensive juxtaposition between the measured and predicted longitudes regression for four satellites: Eutelsat-33A, IS-801, Meteosat-6, and Turksat-2A. Remarkably, the data points congregate closely along the 45-degree line, signifying a substantial correlation between the predicted and observed longitudes. The quantitative metrics further underscore the model's efficacy. The regression value (R) demonstrates an exceptional score of 0.9999, underscoring the robust and meaningful relationship between the predicted and measured data points.



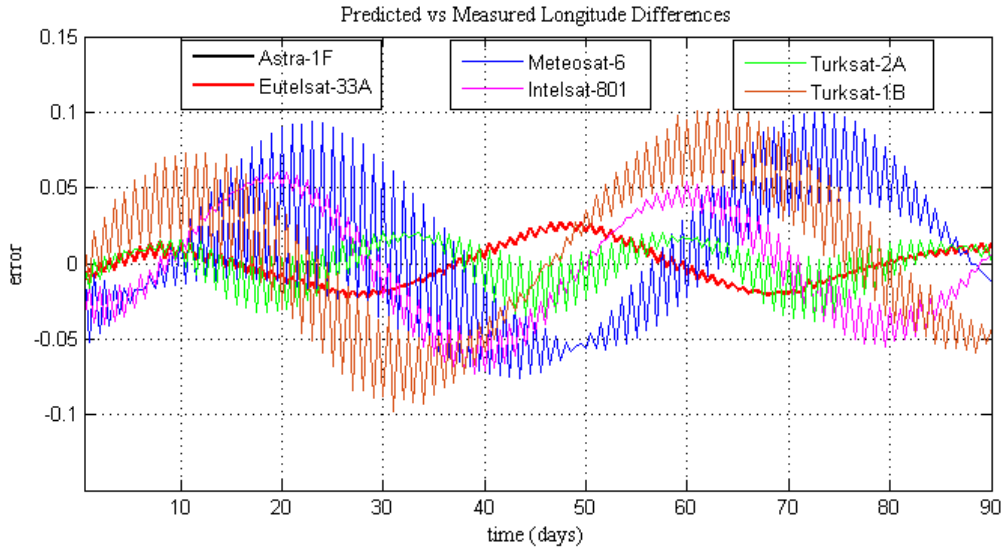
**Figure 6.** Regression Analysis of Predicted vs. Measured Longitudes for Four Decommissioned Satellites

Figure 7 provides a comprehensive visualization of the discrepancies between measured and predicted values for all six satellites, each represented by distinct colors as indicated in the legend. The x-axis represents the passage of time in months over a span of two years, while the y-axis depicts the magnitude of errors, which varies for each satellite. Despite the distinct amplitudes of these errors, it is notable that all error values remain consistently low across the board. This collective observation serves as a strong testament to the efficacy and accuracy of the employed modeling approach.



**Figure 7.** Comparison of Measured and Predicted Longitude Differences over 24 Months for All Six Decommissioned Satellites

Figure 8 offers an enhanced perspective by zooming in on the details of Figure 7, specifically focusing on a 3-month timeframe for all satellites, namely Astra-1F, Eutelsat-33A, Meteosat-6, Intelsat-801, Turksat-1B, and Turksat-2A. Notably, the sine wave ripples observable in the graph are attributed to the influence of eccentricity and other external factors such as the sun and the moon that influence the satellite orbits. These ripples exhibit distinct patterns for each satellite due to their unique orbital characteristics. Remarkably, the error values associated with these predictions remain consistently small, underscoring the precision and effectiveness of the modeling approach employed in this study.



**Figure 8.** Zoomed-in Three-Month Comparison of Predicted vs Measured Longitude Differences for All Six Satellites

Table 2 furnishes a comprehensive comparison of the anticipated and observed variations in satellite longitudes and the accompanying Mean Squared Error (MSE) calculations for both single-input and three-input scenarios. The outcomes are achieved through the implementation of a neural network model. The table further presents the regression values for the respective input conditions, providing insights into the predictive accuracy.

The tabulated data highlights the precision of the model's predictions for each satellite. Evidently, the MSE values for both single-input and three-input configurations are considerably low, signifying the adeptness of the neural network in capturing and modeling the intricate dynamics of the satellites' longitudinal behaviors. The regression values near 1 indicate a robust correlation between the predicted and measured values, underlining the efficacy of the neural network approach in this study.

**Table 2.** Comparison of Predicted vs. Measured Satellite Longitudes Differences and Their Mean Squared Errors (MSE) for Single and Three Inputs Obtained Using Neural Network

Sat name	MSE (1 input)	MSE (3 inputs)	Regression (1 and 3 inputs)
Astra-1F	$8.628 \times 10^{-4}$	$1.175 \times 10^{-4}$	0.99999
Eutelsat-33A	$1.695 \times 10^{-4}$	$1.209 \times 10^{-4}$	0.99999
Intelsat-801	$1.615 \times 10^{-3}$	$1.624 \times 10^{-3}$	0.99999
Meteosat-6	$3.358 \times 10^{-3}$	$1.067 \times 10^{-4}$	0.99999
Turksat-1B	$2.858 \times 10^{-3}$	$3.593 \times 10^{-5}$	0.99999
Turksat-2A	$4.419 \times 10^{-4}$	$1.375 \times 10^{-5}$	0.99999
Average	<b><math>1.551 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>3.364 \times 10^{-4}</math></b>	<b>0.99999</b>
Standard dev.	<b><math>1.312 \times 10^{-3}</math></b>	<b><math>6.322 \times 10^{-4}</math></b>	<b>0.00000</b>

This analysis demonstrates the model's consistent performance across the different satellites, further solidifying its reliability. The average MSE and standard deviation values for both input scenarios reinforce the model's accuracy and consistency.



The collective findings of this study strongly affirm the effectiveness of the employed neural network model in accurately predicting variations in satellite longitudes, thereby enriching our comprehension of decommissioned geostationary satellite behaviors in real-world scenarios. These results resonate with similar studies in the field. For instance, Ariafar and Rudiger investigated the long-term evolution of retired geostationary satellites [29]. Baresi et al. delved into the long-term evolution of mid-altitude quasi-satellite orbits, contributing to the broader understanding of orbital dynamics [30]. Proietti et al. provided insights into the long-term orbit dynamics of decommissioned geostationary satellites, aligning with the objectives of this study [31]. The confluence of these findings highlights the model's robustness and positions it within the broader context of established research endeavors, bolstering its credibility and applicability in contributing to the field's knowledge base.

In light of these findings, our study contributes to the growing body of research aimed at unraveling the intricacies of space science through advanced computational techniques. The application of time series neural networks in modeling satellite behavior displays their potential for understanding complex orbital dynamics and predicting satellite characteristics. As we continue to delve into the nuances of space phenomena, such predictive models stand to play a pivotal role in the optimal management of space assets, enhancing both the efficiency and sustainability of satellite operations.

In summary, this study represents a significant advancement in modeling the longitudinal evolution of decommissioned geostationary satellites. By employing time series neural networks, we have established a robust framework for accurately predicting satellite behavior, thereby contributing to our understanding of orbital dynamics and facilitating effective space asset management.

The successful modeling of decommissioned geostationary satellites' longitudinal evolution using time series neural networks carries several important benefits and implications for future space science and satellite operations. Accurately predicting satellite behavior post-decommissioning provides valuable insights for mission planning and decision-making. Operators can leverage the predictive model to plan end-of-life maneuvers, ensuring decommissioned satellites are safely moved to graveyard orbits, minimizing space debris generation, and optimizing resource allocation. Moreover, accurate prediction of satellite behavior post-decommissioning contributes to the sustainability and longevity of space operations by preventing satellites from becoming potential sources of space debris.

## 5. Conclusion

In conclusion, this study comprehensively explores the longitudinal evolution of decommissioned geostationary satellites using time series neural networks. By harnessing the power of advanced computational techniques, we have successfully modeled the behavior of these satellites after their operational lives end. Our investigation, supported by a robust dataset extracted from publicly available sources, highlights the intricate relationship between orbital dynamics and satellite longitudinal variations. The predictive capabilities of our neural network model offer significant benefits for space science, satellite operations, and the broader aerospace industry. Our findings demonstrate that accurate predictions of satellite behavior post-decommissioning contribute to enhanced mission planning, resource optimization, and effective space debris mitigation.

The successful modeling of decommissioned satellite behavior contributes to the scientific community and the responsible stewardship of our celestial environment. With each accurate prediction, we move closer to ensuring the harmony of human activities in space with preserving the space environment for generations to come.

## References

- [1] Soop EM. Introduction to geostationary orbits 1993: ESA.
- [2] Oz I. Coverages stabilization of an inclined orbit communication satellite with two axis biases. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture* 2022; 38:1, pp. 219-230.
- [3] Oz I, Yilmaz UC. Determination of coverage oscillation for inclined communication satellite. *Sakarya University Journal of Science* 2020; 24(5), 973-983.
- [4] ITU Radiocommunication Sector: Regulations and procedures for space radio communication, Recommendation ITU-R S.1003-1, 2021.
- [5] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC): IADC Space debris mitigation guidelines. 2007; Issue 3.0.
- [6] European Space Agency (ESA): Space debris mitigation handbook. *ESA Bulletin*, 2005; Issue 123.
- [7] Büyükkeçeci M, Okur MC. A comprehensive review of feature selection and feature selection stability in machine learning. *Gazi University Journal of Science*, 2024; 1-10.
- [8] Ameur T, Eddine A, Benalia A. ANN identification technique and fuzzy pi control of a hybrid indirect matrix converter with a flying capacitor three level inverter in power active filtering application. *Gazi University Journal of Science*, 2023;1-10.
- [9] Seymen OF. et al. Customer churn prediction using ordinary artificial neural network and convolutional neural network algorithms: a comparative performance assessment. *Gazi University Journal of Science*, 2023.

- [10] Erdem OE, Kesen SE. Estimation of Turkey's natural gas consumption by machine learning techniques. *Gazi University Journal of Science* 2020; 33.1: 120-133.
- [11] Rayan, AB, Artuner H. LSTM-Based deep learning methods for prediction of earthquakes using ionospheric data. *Gazi University Journal of Science* 2022; 35.4: 1417-1431.
- [12] Wickramasinghe L, Ekanayake P, Jayasinghee J. Machine learning and statistical techniques for daily wind energy prediction. *Gazi University Journal of Science* 2022; 35.4: 1359-1370.
- [13] Alshari H, Odabas A. Machine learning model to diagnose diabetes type 2 based on health behavior. *Gazi University Journal of Science* 2022;35.3. 834-852.
- [14] Tombaloğlu B, Erdem H. Turkish speech recognition techniques and applications of recurrent units (LSTM and GRU). *Gazi University Journal of Science* 2021;34.4: 1035-1049.
- [15] Montenbruck O, Gill E. *Satellite orbits: models, methods, and applications*, Springer 2011.
- [16] Li HN. *Geostationary satellite collocation*, Springer 2010.
- [17] Piani S. *Analytical model for propagation of debris clouds in geostationary orbit*. Tesi di Laurea Magistrale in Space Engineering, Ingegneria Spaziale. 2022.
- [18] Thomas R, Linares R. A survey of longitudinal-shift maneuvers performed by geosynchronous satellites from 2010 to 2021, 2022; 73rd Astronautical Congress, Paris, France.
- [19] CarvalhoMoraes SJP, Prado A. Analysis of the orbital evolution of space debris using a solar sail and natural forces. *Advances in Space Research* 2022; v 70(1), 125-143.
- [20] Byoung-Sun L. East–West station-keeping maneuver strategy for COMS satellite using iterative process. *Advances in space research* 2011; 47.1: 149-159.
- [21] <https://www.space-track.org/> last access March 2023.
- [22] Stepišnik T. Machine learning for effective spacecraft operation: Operating INTEGRAL through dynamic radiation environments. *Advances in Space Research* 2020; 69.11: 3909-3920.
- [23] Thomas R, Soleraa HE, Linaresa R. Geosynchronous satellite behavior classification via unsupervised machine learning. In 9th Space Traffic Management Conference. Austin, 2023; TX (Vol. 3).
- [24] Roberts T. *Geosynchronous Satellite Maneuver Classification and Orbital Pattern Anomaly Detection via Supervised Machine Learning*. Diss. Massachusetts Institute of Technology, 2021.
- [25] Solera HE, Linares R. Geosynchronous satellite pattern of life node detection and classification, 9th Space Traffic Management Conference, Austin TX, 2023.
- [26] Çelikel R, Gündoğdu A. ANN-based MPPT algorithm for photovoltaic systems. *Turkish Journal of Science and Technology* 202; 15.2: 101-110.
- [27] Toraman S, Turkoglu I. A new method for classifying colon cancer patients and healthy people from FTIR signals using wavelet transform and machine learning techniques. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2020;35.2: 933-942.
- [28] Dogan F, Turkoglu I. Derin öğrenme modelleri ve uygulama alanlarına ilişkin bir derleme. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 2019;10.2: 409-445.
- [29] Ariafar S, Rüdiger J. Long-term evolution of retired geostationary satellites. 4th European Conference on Space Debris, 2005; Vol. 587.
- [30] Baresi Net al. Long-term evolution of mid-altitude quasi-satellite orbits. *Nonlinear dynamics*, 2020; 99: 2743-2763.
- [31] Proietti S et al. Long-term orbit dynamics of decommissioned geostationary satellites. *Acta Astronautica* 2021;182: 559-573.

## Farklı Polimerlerle Modifiye Edilmiş Asfalt Bağlayıcıların MSCR Testi Kullanarak Yüksek Sıcaklık Performanslarının Değerlendirilmesi

Erkut YALÇIN<sup>1\*</sup>, Mehmet YILMAZ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> erkutyalcin@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mehmetyilmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/01/2024;

Kabul/Accepted: 19/03/2024)

**Öz:** Bu çalışmada çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) deneyleri kullanılarak farklı katkı maddelerinin asfalt bağlayıcıların gerilme kaynaklı davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Saf asfalt bağlayıcı farklı oranlarda SBS, 611 ve 701 polimerleri ile modifiye edilmiştir. Deney 6 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve her döngüde sünme geri dönme uyumu ( $J_{nr}$ ) ve geri kazanım yüzdesi (R) hesaplanmıştır. Ortalama  $J_{nr}$  ve ortalama R değerleri de farklı gerilme seviyelerinde hesaplanmıştır. Bulgular, tüm modifiye bağlayıcılar için daha yüksek gerilme seviyelerinin daha belirgin doğrusal olmayan davranışla ilişkili olduğunu göstermiştir. Özellikle modifiye bağlayıcılar hem düşük hem de yüksek gerilme seviyelerinde artan sıcaklıklara karşı esnek özellik sergilemiştir. Ayrıca, elastic geri dönme değerleri farklı sıcaklıklarda her üç bağlayıcıda da katkı maddesinin artmasıyla artmıştır. Saf bağlayıcının elastic geri dönme özelliklerini geliştirme noktasında en iyi katkı maddesi 611 olarak belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Polimer, modifikasyon, MSCR, katkı ilavesi.

### Evaluation of High Temperature Performance of Asphalt Binders Modified with Different Polymers Using MSCR Test

**Abstract:** In this study, the effects of different additives on the stress-induced behaviour of asphalt binders were investigated using multiple stress creep recovery test (MSCR) experiments. Pure asphalt binder was modified with different proportions of SBS, 611 and 701 polymers. The experiment was carried out at 6 different temperatures and the creep recovery compliance ( $J_{nr}$ ) and recovery percentage (R) were calculated for each cycle. Average  $J_{nr}$  and average R values were also calculated at different stress levels. The results showed that higher stress levels were associated with more pronounced nonlinear behaviour for all modified binders. In particular, the modified binders exhibited resilient behaviour against increasing temperatures at both low and high stress levels. Furthermore, the elastic return values increased with increasing additive in all three binders at different temperatures. The best additive for improving the elastic return properties of the pure binder was determined as 611.

**Key words:** Polymer, modification, MSCR, additive addition.

#### 1. Giriş

Tekerlek izi oluşumu, asfalt kaplamada tekrarlı yüklemeler ve ağır yüklerin neden olduğu önemli bir hasar şeklidir. Bu hasar asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleriyle yakından ilişkilidir [1,2]. Superpave performans sınıflandırma (PG) sisteminde, asfalt bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki tekerlek izi performansı geleneksel olarak  $|G^*|/\sin\delta$  tekerlek izi faktörü ile karakterize edilir, burada  $|G^*|$  dinamik kayma modülüdür ve  $\delta$  faz açısıdır [3]. Tekerlek izi faktörü, doğrusal viskoelastik (LVE) teorisine dayalı olarak küçük salımlı yüklemelerde dağılan enerji yoğunluğundan türetilir [4]. Bu parametre mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen, polimer modifiyeli ve kırıntı kauçuk modifiyeli bağlayıcılar için asfaltın kalıcı deformasyona karşı direncini gerçekçi bir şekilde değerlendiremediğini göstermektedir [2]. Asfalt karışımlarında kalıcı deformasyona gerçekten katkıda bulunan ve viskoz akışta harcanan enerji, geri kazanılabilir viskoelastik deformasyonda harcanan enerjiden etkili bir şekilde ayırt edilemez [4].

Tekerlek izi faktörü testine alternatif olarak çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testi geliştirilmiştir [5, 6]. MSCR testi düşük gerilim seviyesi (0.1 kPa) ve yüksek gerilim seviyesi (3,2 kPa) kullanır. Her iki gerilim seviyesinde de ön sünme (1s) - toparlanma (9s) döngüsü gerçekleştirilir [7]. İki parametre, kalıcı sünme uyumu  $J_{nr}$  ve geri kazanım yüzdesi R, her yüklemeye döngüsünden hesaplanabilir. Her bir gerilim seviyesindeki ön döngü boyunca her iki parametrenin ortalaması, bağlayıcıların gerilime bağlı doğrusal olmayan viskoelastik özelliklerine erişim için ayrıca kullanılabilir. Bazı çalışmalar,  $J_{nr}$ 'nin karışımın tekerlek izi performansı ile tatmin edici bir korelasyon sergilediğini göstermiştir [6, 8-10]. Diğer çalışmalar MSCR testinin [11,12] potansiyel iyileştirmeleri ve sınırlamalarının yanı sıra MSCR testinin temel deneysel parametrelerinin

\* Sorumlu yazar: [erkutyalcin@firat.edu.tr](mailto:erkutyalcin@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-6389-4211, <sup>2</sup> 0000-0002-2761-2598

etkisini [13] tartışmıştır. MSCR testi, saf ve modifiye bağlayıcılar arasındaki tekerlek izi direncindeki farkı daha iyi tanımlayabildiğinden [5,9,14,15], yeni geliştirilen Superpave PG spesifikasyonuna dahil edilmiştir [16]. Wasage ve ark. [8], MSCR testinin sünme-elastik geri dönmesini sırasıyla simüle etmek için sürekli bir gecikme spektrum modeli ve doğrusal olmayan bir viskozite modeli kullanmıştır. Delgadillo ve ark. [17] ve Saboo ve Kumar [19] MSCR gerinim sonuçlarını tahmin etmek için güç yasası modellerini kullanmıştır. Bu modeller basittir ancak parametre sayılarının az olması nedeniyle büyük gerilimlere maruz kalan bağlayıcılar için kullanıldığında ciddi zorluklarla karşılaşabilirler. Gerilime bağlı doğrusal olmayan viskoelastik (NLVE) davranışını simüle etmedeki doğruluğu artırmak için Masad ve ark. [19], Schapery modelinin [20] basitleştirilmiş bir formunu çalışmışlardır. Sadeq ve ark. [21] bu yöntemi ayrıca sıcak karışım katkı maddeleri içeren asfalt bağlayıcıların doğrusal/doğrusal olmayan viskoelastik ve geri kazanılmaz davranışlarını analiz etmek için kullanmışlardır. Liu ve diğerleri. [22], Schapery'nin NLVE modelini kullanarak 3.2 kPa'da on döngü için ortalama gerinim tepkisini modelledi. Luo ve diğerleri. [23] MSCR testinin sünme-elastik geri dönme karakterize etmek için Schapery ve Perzyna modellerini ayrı ayrı kullandılar.

Bu çalışma, çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testlerini kullanarak SBS, 611 ve 701 katkılarının asfalt bağlayıcıların reolojik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, asfalt bağlayıcıların gerilime bağlı davranışını ve tekerlek izi oluşumuna duyarlılığını incelemek için her biri farklı gerilim seviyelerine ve değişen sayıda çevrim ve yükleme koşullarına sahip iki seri standart dışı MSCR testi kullanılmıştır. Bu deneysel araştırma tamamlandıktan sonra çeşitli katkı maddelerin (yani SBS, 601 ve 701) asfalt bağlayıcıların gerilime bağlı davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Mevcut Superpave asfalt bağlayıcı deneylerinde, tekerlek izi, DSR deneyinden elde edilen  $G^*/\sin\delta$  değeri ile ilişkilendirilmekteydi. Bu ilişki modifiye edilmeyen bağlayıcılarda iyi sonuç vermekte ancak modifiye bağlayıcılarda başarısız olmaktadır. Buna karşın yeni geliştirilen MSCR deneyinden elde edilen parametrenin ( $J_{nr3.2}$ ) hem modifiye hem de modifiye edilmeyen bağlayıcılarda gerçek tekerlek izi ile yüksek bir korelasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Zhang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada kauçuk modifiyeli bağlayıcı kullanılmışlardır. Bağlayıcılar üzerinde MSCR teti yapmışlardır. MSCR test sonuçlarına göre, kauçukla modifiye edilmiş asfalt üretmek için daha düşük kauçuk inceliği veya daha düşük dereceli saf asfalt kullanıldığında birikmiş gerinimin önemli ölçüde azaldığını doğrulamışlardır [24]. Wu ve ekibinin yaptıkları çalışmada, kuru proses kauçuklu asfalt karışımında kauçuğun asfalt bağlayıcı üzerindeki reolojik etkisini incelemişlerdir. Kauçuk modifikasyonu asfalt bağlayıcının elastik özelliğini ve deformasyon direncini arttırmasına rağmen, asfalt bağlayıcının gerilme hassasiyetini azaltmıştır [25].

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Materyal

Bu çalışmada, modifiye asfalt bağlayıcıların reolojik özelliklerini ve gerilime bağlı davranışlarını incelemek için saf bir bağlayıcı üç farklı katkı maddeleriyle modifiye edilmiştir. Saf bağlayıcının penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve penetrasyon indeksi değerleri sırasıyla 62dmm, 53.3°C, 245°C ve 0.119 olarak belirlenmiştir. Bu bağlayıcıların reolojik özelliklerine ilişkin daha fazla bilgi literatürdeki çalışmada yer almaktadır [26]. Katkı maddelerin türü ve miktarı da dahil olmak üzere modifiye bağlayıcıların ayrıntıları Tablo 1'de sunulmaktadır.

**Table 1.** Saf ve modifiye bağlayıcıların isimlendirilmesi

Bağlayıcı tipi kısaltması	Polimer içeriği (%)			
	0	2	3	4
SBS	-	M1	M3	M5
701	-	M6	M8	M10
611	-	M11	M13	M15
Saf bitüm	S1-S2	-	-	-

### 2.2. Modifiye Bitüm Hazırlama

Saf bağlayıcıya üç farklı oranda (%2, %3 ve %4) polimerler ilave edilerek modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Bu üç oranın seçilmesinin sebebi önceki çalışmalarda kullanılan en çok oranlar olmasıdır. Modifiye bağlayıcıların hazırlanmasında yüksek hızlı karıştırıcı kullanılmıştır. İlk önce saf bitüm 170±5°C sıcaklıktaki etüvde 30 dakika ısıtılarak akışkan hale getirilmiştir. Daha sonra mikserin metal kabına 400g sıvı hale gelmiş bitüm ilave edilmiştir. Metal haznedeki bitüm, 170±5°C'de şartlandırılmış ısıtıcı kaynağı üzerinde termal gömlek

içinde bırakıldı ve ısıtıcı,  $170\pm 5^\circ\text{C}$  termal dengeye ulaşıncaya kadar çalışır durumda tutulmuştur. Tartılan bitüm ağırlığına göre önceden belirlenmiş yüzde de polimer katkısı ilave edilmiştir. Bitüm içeren polimerleri hazırlamak için 1000 rpm'de bir saat çalışan mekanik bir karıştırıcı kullanılmıştır [26]. Oksidasyon etkisini belirlemek için saf bağlayıcı da aynı şartlar kullanılarak karıştırılmıştır. Saf bağlayıcının modifiye bitüm karıştırma prosesinden geçirilmesiyle S1 bağlayıcı üretilmiştir. Penetrasyon derecesi 50/70 olan saf bitüm, S2 sembolü ile gösterilmiştir.

### 2.3. Çoklu Gerilme Uygulaması Sonrası Sünme-Elastik Geri Dönme (MSCR) Testi

Bu çalışmada, AASHTO T350 kurallarına bağlı kalarak T315 (AASHTO T315, 2019) standartlarına uygun olarak üretilen hem saf bağlayıcılar hem de atık yağlı bağlayıcılar üzerinde çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testi yapılmıştır. Asfalt bağlayıcı numunesi 25 mm çapında ve 1 mm kalınlığındadır. Test, DSR makinesindeki su banyosu kullanılarak kontrol edilen asfalt bağlayıcının yüksek çalışma sıcaklığında gerçekleştirilir. MSCR testi  $58^\circ\text{C}$ - $88^\circ\text{C}$  sıcaklıkları arasında yapılmıştır. MSCR testi  $58^\circ\text{C}$ 'den başlayarak her  $6^\circ\text{C}$ 'de bir sıcaklık artırılarak  $88^\circ\text{C}$ 'ye kadar test yapılmıştır. Her döngü için numuneye 1 saniye boyunca kayma yükü uygulandıktan sonra, 9 saniyelik bir dinlenme periyodu uygulanır. İki kez 0.1 kPa ve bir kez 3.2 kPa olmak üzere iki gerilim seviyesi art arda uygulanmakta ve her bir gerilim seviyesi için toplam 10 çevrim gerçekleştirilmektedir. Uygulanan 0.1 kPa gerilme seviyesinden ikinci sonuçlar ve 3.2 kPa seviyesindeki sonuçlar alınarak değerlendirilir. MSCR testi, asfalt bağlayıcının kayma sürünme yükü altında geri kazanım ve geri kazanım yüzdesi olan geri kazanım ve geri kazanılmama özelliklerini karakterize etmektedir. Kurtarılabılır sürünme uyumluluğu ( $J_{nr}$ ).  $J_{nr}$ , BSK'nın tekerlek izi potansiyelini değerlendirmek için kullanılır ve kurtarılamayan kayma geriliminin kayma gerilimine bölünmesiyle belirlenir.  $J_{nr}$ 'nin matematiksel ifadesi Denklem 1, 2 ve 3'te gösterildiği gibidir:

$$J_{nr0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [J_{nr}(0.1, N)]}{10} \quad (1)$$

$$J_{nr3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [J_{nr}(3.2, N)]}{10} \quad (2)$$

$$J_{nr\text{diff}} = \frac{(J_{nr3.2} - J_{nr0.1})}{J_{nr0.1}} * 100 \quad (3)$$

AASHTO M332 (2015)'e göre, sırasıyla 0.1 ( $R_{0.1}$ ) ve 3.2 ( $R_{3.2}$ ) kPa kayma gerilimi değerleri için bitümlü bağlayıcıların ortalama geri kazanım oranlarını ( $R$ ) belirlemek için Denklem 4 ve 5 kullanılır.

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [\varepsilon_r(0.1, N)]}{10} \quad (4)$$

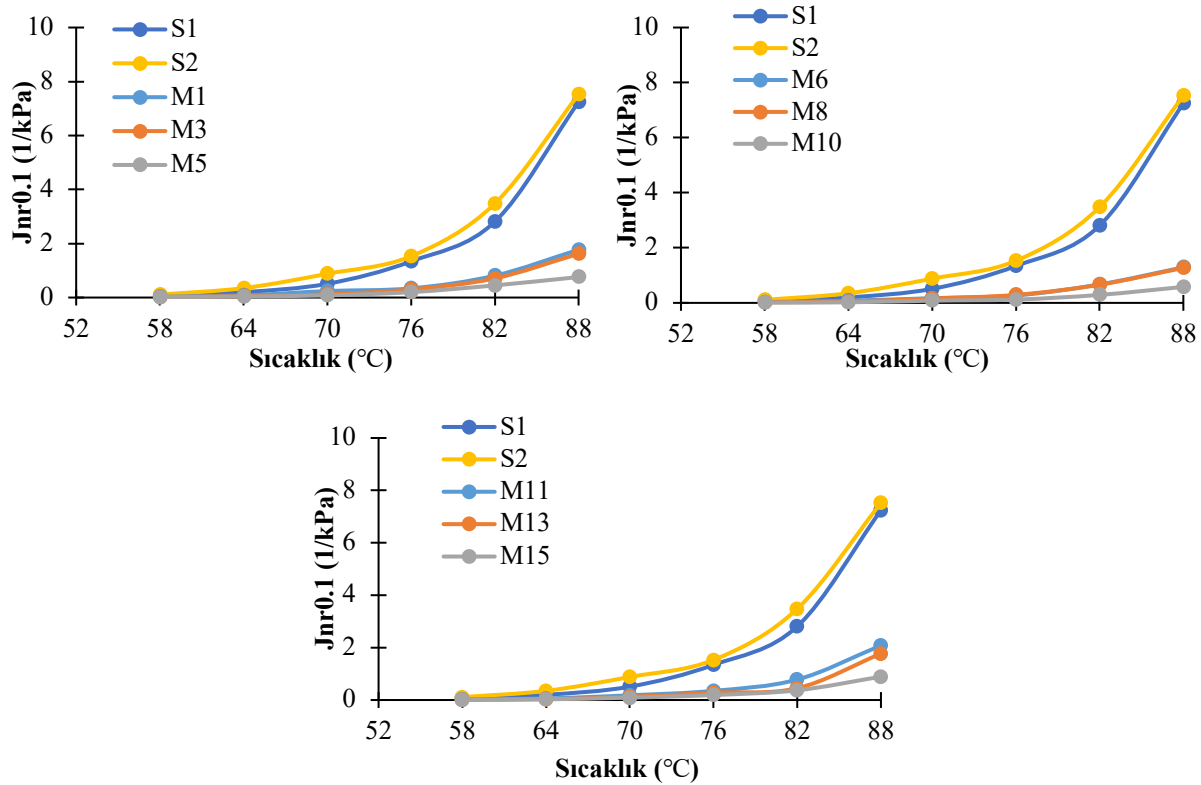
$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [\varepsilon_r(3.2, N)]}{10} \quad (5)$$

Bu denklemlerde N, herhangi bir gerilim seviyesindeki döngü sayısını temsil ederken, N döngülerdeki ve 0.1 ve 3.2 kPa gerilim seviyelerindeki iyileşme yüzdeleri sırasıyla  $\varepsilon_r(0.1, N)$  ve  $\varepsilon_r(3.2, N)$  olarak gösterilir.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. MSCR Deney Sonuçları

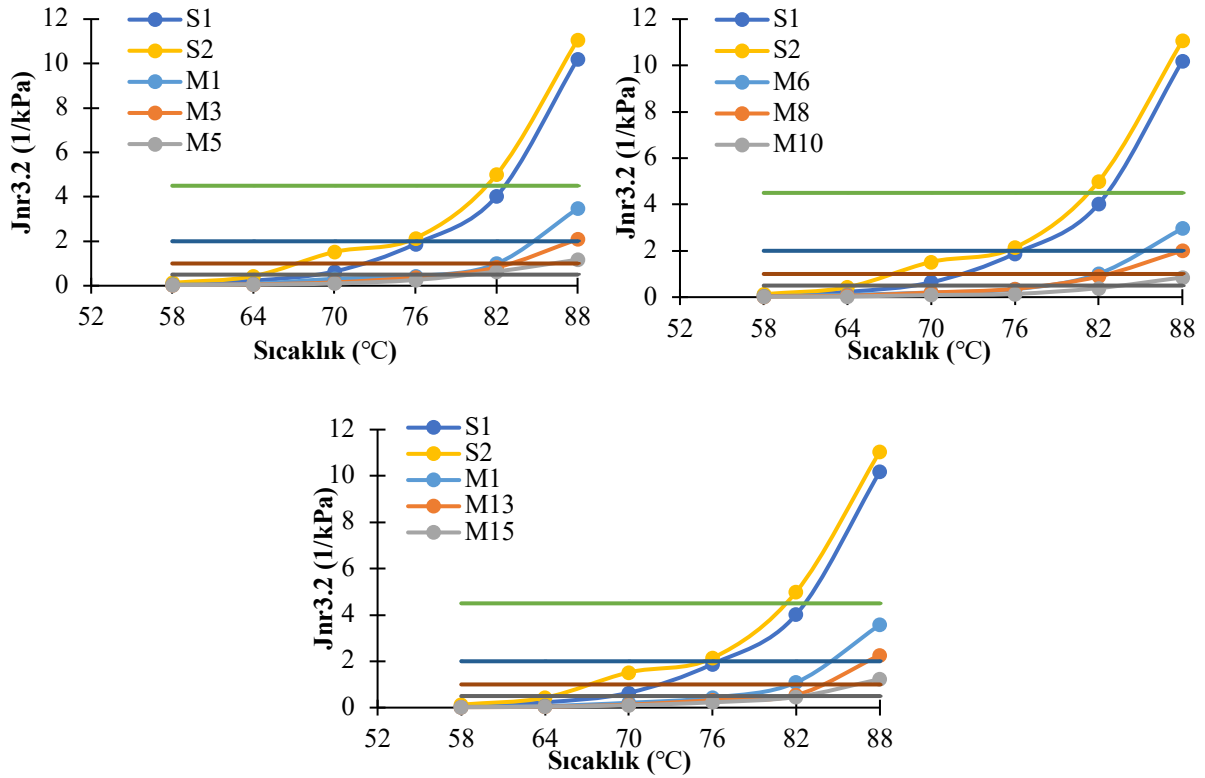
Şekil 1'de SBS, 701 ve 611 katkılı bağlayıcıların  $J_{nr0.1}$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Sıcaklığın artması ile bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerleri artmaktadır. Bu artış saf bağlayıcıda 76 °C'den itibaren önemli derecede meydana gelmektedir. Çalışmada kullanılan üç katkı türü içinde en fazla saf karışımların  $J_{nr}$  değerlerinde artış meydana gelmektedir. SBS ve 701 modifikasyonunda  $J_{nr}$  değerlerindeki artışın belirgin olmaya başladığı sıcaklık 76 °C'dir. 611 katkılı bağlayıcılarda da bu belirgin artış 76 °C'den sonra olmaktadır. 76 °C'den sonra en hızlı artış gösteren bağlayıcı 611 katkılı bağlayıcılardır. Modifiyeli bitümlü karışımların yüksek sıcaklık ve düşük gerilme durumunda tekerlek izine karşı dirençli olacağı açıktır. Üç katkının da bağlayıcılarda kullanılması yüksek sıcaklıklarda önemli bir tekerlek izi direnci göstermektedir. Üç katkı türü de yüksek sıcaklıklarda yaklaşık benzer  $J_{nr}$  değerleri vermektedir. Bütün bağlayıcılar içinde M10 bağlayıcısı her sıcaklıkta en düşük  $J_{nr}$  değerlerini vermiştir. Tüm sıcaklıklarda en yüksek  $J_{nr}$  değerini ise S2 bağlayıcısı vermektedir. Katkı içeriğinin  $J_{nr}$  üzerindeki bu iyileştirme etkisi %2 SBS, %2 701 ve %2 611 gibi düşük katkı içeriğinde önemli bir şekilde meydana gelmekte daha sonra katkı içeriğinin artması ile bu iyileştirme etkisi azalarak devam etmektedir. %2 SBS katkılı bağlayıcıların  $J_{nr}$  değerleri S2 bağlayıcısına göre 58, 64 ve 70 °C'de 3.7; 4.4; 3.7 kat azalmaktadır. Bu azalışlar %2 701 katkılı bağlayıcıda 3.7;7;5.5 kat olmaktadır. Bu azalışlar %2 611 katkılı bağlayıcılarda ise 5.5; 5.8; 4.9 kat olmaktadır. En yüksek  $J_{nr0.1}$  değeri tüm katkılı bağlayıcılarda 88°C'de meydana gelmektedir. En düşük  $J_{nr0.1}$  değerleri 701 katkılı bağlayıcılarda meydana gelmektedir.



Şekil 1.  $J_{nr0.1}$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

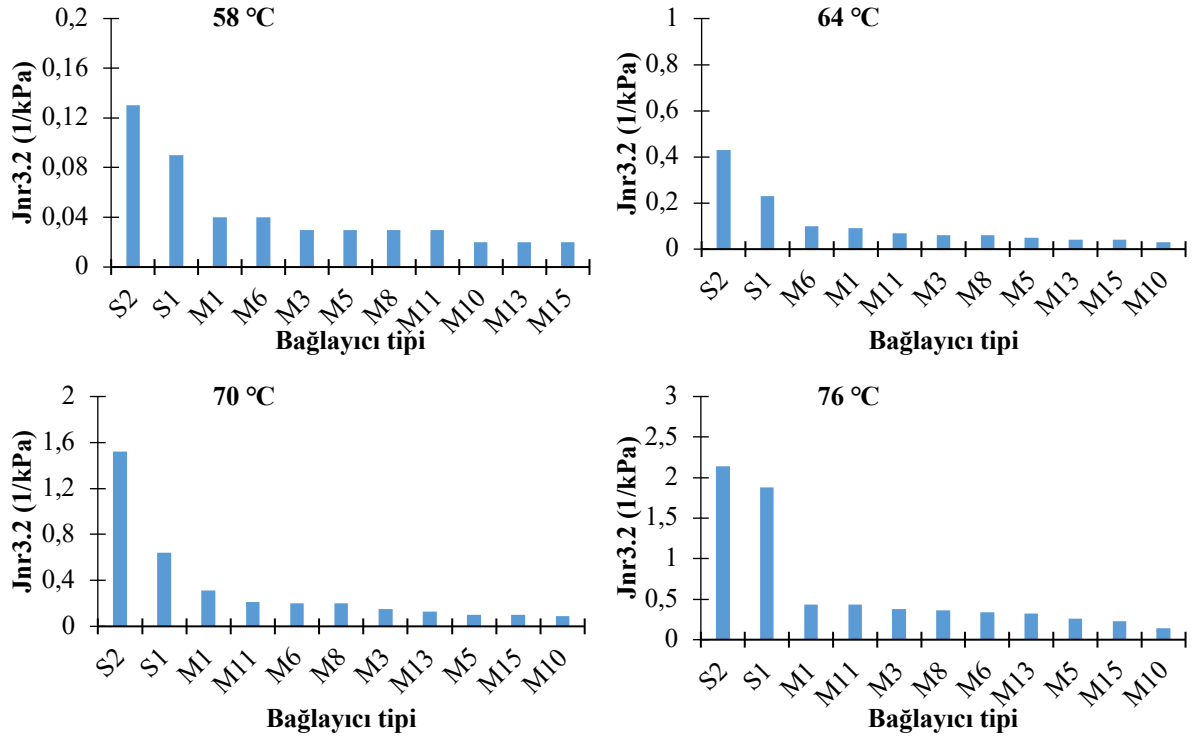
Bağlayıcıların yüksek kesme gerilmesi (3.2 kPa) seviyesinde katkı içeriği ile  $J_{nr}$  değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 2'de verilmiştir. SBS, 611 ve 701 modifikasyonlarında  $J_{nr}$  değerleri katkı içeriğinin artması ile düzenli olarak azalmıştır. Üç katkı türünde de 88°C'de hızlı bir azalış söz konusudur. Katkı içeriğinin düşük sıcaklıklarda  $J_{nr}$  üzerinde çok fazla etkili olmazken yüksek sıcaklıkta (82 °C) etkisini sürdürmektedir. Tüm katkılı bağlayıcılar da 58, 64 ve 70 °C'de birbirine benzer  $J_{nr}$  değeri vermektedir. Her iki modifikasyonda da yüksek sıcaklıkta katkı oranlarının  $J_{nr}$  üzerindeki etkisi daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla katkı oranının etkinliğini

değerlendirmede sıcaklık olarak en az 76°C'nin kullanılması uygun görülmektedir. Sıcaklığın artması ile hem  $J_{nr}$  değerleri hem de  $J_{nr}$  değerleri arasındaki fark önemli derecede artmaktadır. Şekil 2'de ayrıca bağlayıcıların performans seviyelerini belirten limit değerler de görülmektedir.  $J_{nr}$ diff değerleri dikkate alınmaksızın 611 modifikasyonunun SBS modifikasyonuna kıyasla yüksek hacim ve ağırlıktaki trafiği taşıma konusunda yetersiz kaldığı görülmektedir. 76 °C'de tüm modifiyeli bağlayıcıların  $J_{nr3.2}$  değerleri 0.5 kPa'dan küçük olduğu için "E" sınıfına sahiptir. E sınıfı olduğundan trafiği oldukça ağır bir trafiktir. 82 °C'de, M6, M10, M11 ve M15 bağlayıcıları hariç "V" sınıfına girmektedirler. V sınıfı çok ağır trafiği ifade etmektedir. M6 ve M11 bağlayıcıları ise 2°C'de ağır trafik (H) sınıfına girmektedir. 88 °C'de ise M5, M10 ve M15 bağlayıcıları hariç diğer bağlayıcıların hepsi S sınıfına girmektedir.



Şekil 2.  $J_{nr3.2}$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 3'te bütün bağlayıcıların  $J_{nr3.2}$  değerleri büyükten küçüğe doğru sıralı olarak verilmiştir. Üç farklı elastomer katkılı bağlayıcıların bütün sıcaklıklarda  $J_{nr}$  değerlerinde değişiklik görülmektedir. M10 bağlayıcısı 58°C'deki sıcaklık hariç diğer bütün sıcaklıklarda en düşük üç  $J_{nr}$  değerini vererek en iyi tekerlek izi direncine sahip bağlayıcı olmuştur. Bunun yanı sıra en yüksek  $J_{nr}$  değerini ise tüm sıcaklıklarda S2 bağlayıcısında görülmektedir. 58°C'de en düşük  $J_{nr}$  değerini ise M15 bağlayıcısından elde edilmiştir. Diğer taraftan %2 SBS modifikasyonun  $J_{nr}$  değeri 70°C ve 76 °C'de sırasıyla 3.7 ve 4.5 kat azaltılmaktadır.

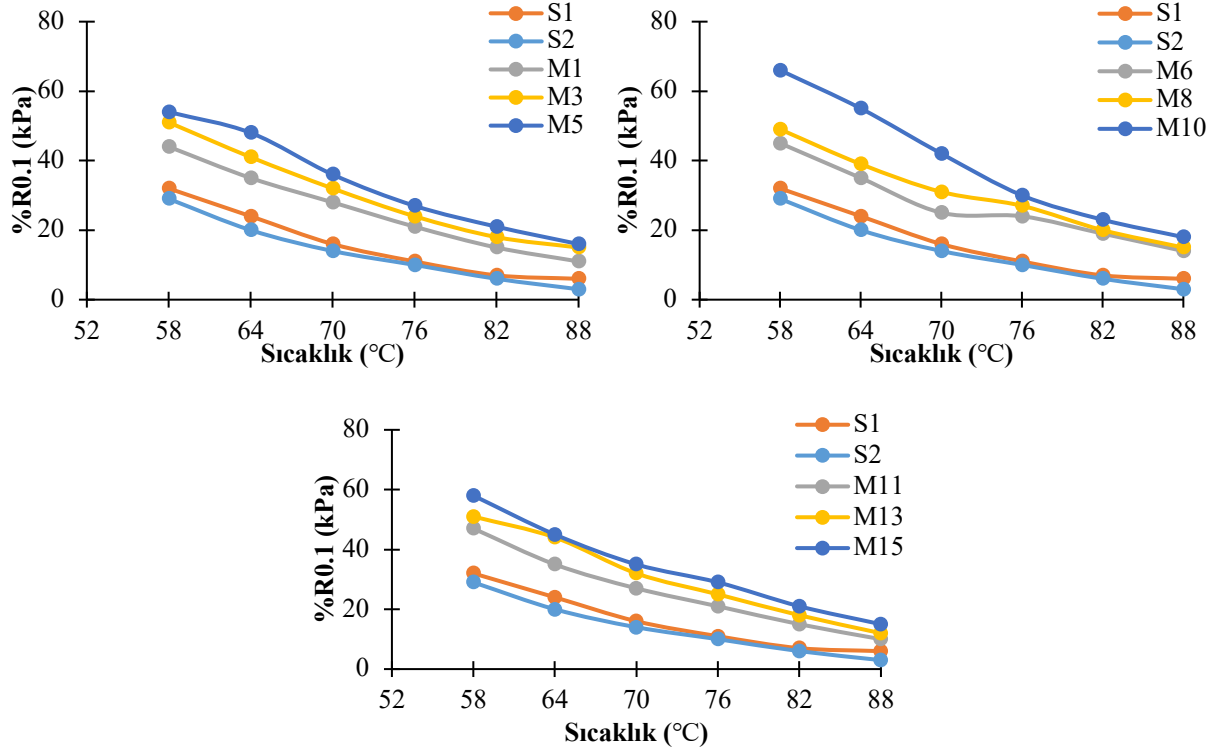


Şekil 3. Bütün bağlayıcıların  $J_{nr3,2}$  değerlerinin sıralı olarak değişimi

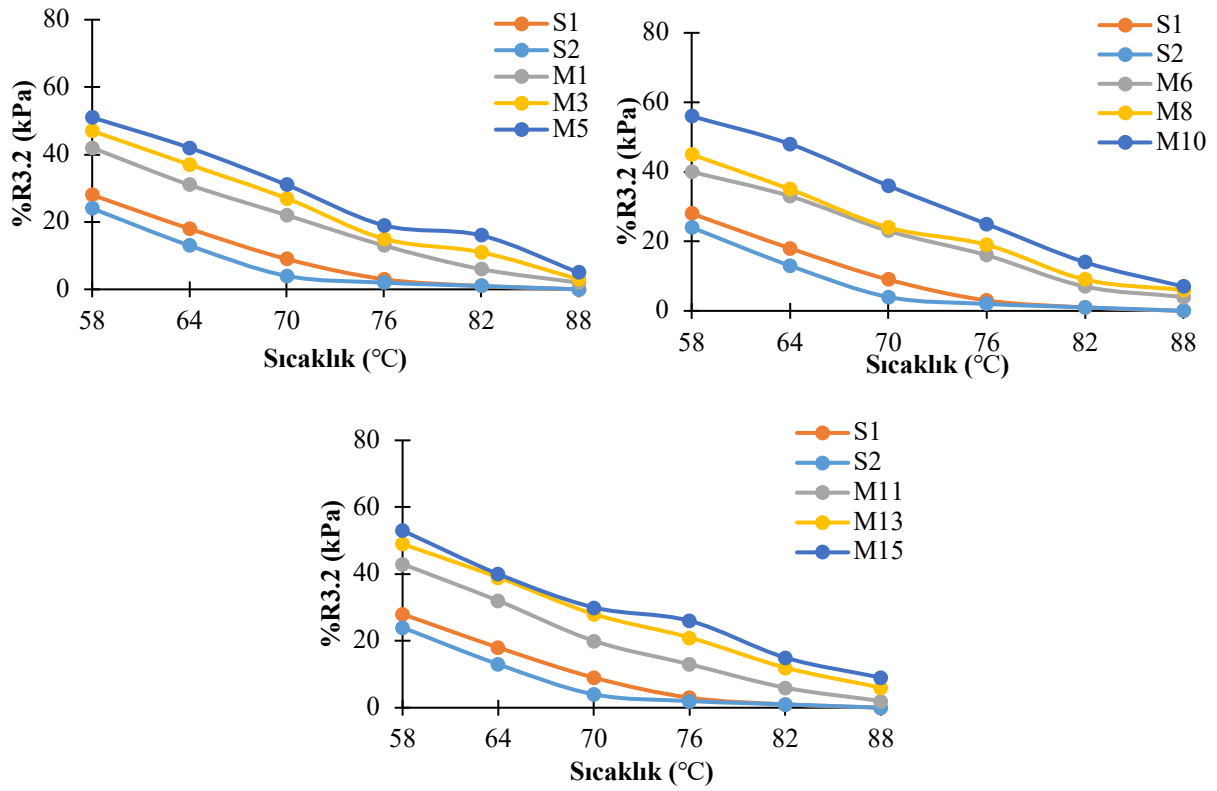
Saf bağlayıcılar hariç modifikasyonların tümü sıcaklığın artması ile esnekliğini daha iyi koruyabilmektedir (Şekil 4). %3 SBS katkılı bağlayıcı 0.1 kPa gerilme seviyesinde sıcaklığın 58 °C'den 76 °C'ye yükselmesi durumunda elastikliğinin 2.68'ini kaybetmektedir. %3 701 katkılı bağlayıcı ise sadece %1.81'ini kaybetmektedir. 70°C'de %4 SBS, %4 701 ve %4 611 katkılı bağlayıcılar S1 bağlayıcısının %R değerlerini sırası ile 1.37; 1.41 ve 1.47 kat artırırken S2 bağlayıcısına göre ise sırasıyla 1.52; 1.56 ve 1.62 kat artırmaktadır. Bu sonuçlar bize modifiye bitüm hazırlama sürecindeki saf bağlayıcıdaki yaşlanmayı göstermektedir. %4 701 katkılı bağlayıcı her sıcaklıkta en yüksek geri dönme değerlerine sahiptir. Üç katkı oranı içinde 76 °C'den sonra elastiklerinin sıcaklıkla değişimi konusunda benzer performans gösterdikleri görülmektedir. Elastik geri dönme değerleri bütün sıcaklıklarda her üç modifikasyonda da katkı içeriğinin artması ile artmaktadır. Bu artış SBS modifikasyonunda 58 ve 64 °C'de katkı içeriğinin artması ile sürekli meydana gelirken 70 °C ve 76 °C'de %4 katkı içeriğinden sonra çok fazla değişmemektedir. Tüm modifikasyonlar da ise %R değerleri her sıcaklıkta katkı içeriğinin artması ile düzenli olarak artmaktadır. 58 °C'de en elastik geri dönme değerini 701 katkısı içeren bağlayıcıda 1.82 kat az elastik geri dönme sağlamaktadır.

SBS, 701 ve 611 modifiyeli bağlayıcıların 3.2 gerilme seviyesinde elastik geri dönme değerlerinde sıcaklıkla meydana gelen değişim Şekil 5'de verilmiştir. SBS modifikasyonunda sıcaklığın artması ile %R değerlerinde meydana gelen azalış daha belirgindir. 76°C'ye kadar hızlı bir azalış meydana gelirken 76 °C'den sonra azalış hızı azalmaktadır. S1 ve S2 bağlayıcıların esnekliği sıcaklıktan benzer şekilde etkilenmektedir. Sıcaklığın 58 °C'den 76 °C'ye çıkması durumunda %4 SBS, %4 701 ve %4 611 katkılı bağlayıcı esnekliklerinin sırası ile %62.7; %55.4 ve %50.9'unu kaybetmektedir. Düşük gerilme seviyesinde olduğu gibi yüksek gerilme seviyesinde de tüm modifiyeli bağlayıcılar sıcaklık artışı ile esnekliğini daha iyi bir şekilde koruyabilmektedir. Her üç modifikasyonda da gerilmenin 0.1 kPa'dan 3.2 kPa çıkması durumunda elastiklikteki artış yüksek katkı oranında da devam etmektedir. Yüksek gerilmede yüksek katkı oranları düşük gerilmeye göre daha etkili olmaktadır. Diğer taraftan gerilmenin artması ile elastiklik değerleri azalmaktadır. 76 °C'de %2SBS katkılı bağlayıcının 0.1 kPa gerilme seviyesindeki %21 olan elastikliği 3.2 kPa gerilme seviyesinde %13 değerine düşmektedir. Aynı şartlar altında %2 701 ve %2 611 katkılı bağlayıcılarda 0.1 kPa gerilme seviyesindeki %45 ve %47 olan elastikliği 3.2 kPa gerilme seviyesinde ise %40 ve %43 değerine düşürmektedir.



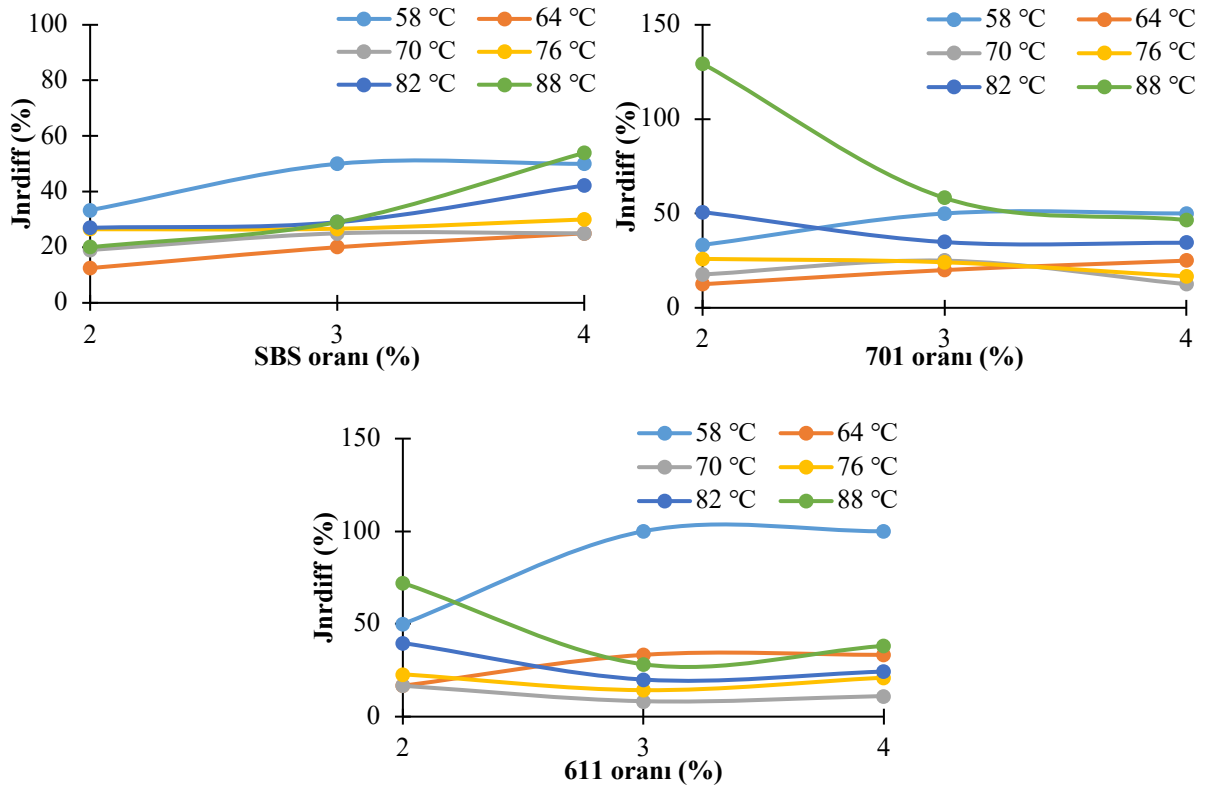


Şekil 4. 0.1 gerilme seviyesinde %R – sıcaklık ilişkisi



Şekil 5. 3.2 kPa gerilmede %R değerlerinin sıcaklıkla değişimi

Bağlayıcıların 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki sünme toparlanmaları arasındaki farkın ( $J_{nr,diff}$ ) %75'ten büyük olması tekerlek izine karşı hassasiyete işaret etmektedir. Şekil 6'da bağlayıcıların  $J_{nr,diff}$  değerlerindeki değişim verilmiştir. Bütün katkılar incelendiğinde  $J_{nr,diff}$  değerlerinde belirgin bir değişiklik görünmemektedir. SBS modifikasyonunda  $J_{nr,diff}$  değerleri 58°C dışında tüm sıcaklıklarda katkı içeriği arttıkça  $J_{nr,diff}$  değerlerinde artış görünmektedir. 701 modifikasyonunda 64°C dışında sıcaklık arttıkça  $J_{nr,diff}$  değerlerinde sürekli arttığı söylenebilir. 611 modifikasyonunda 64°C dışında sıcaklık arttıkça  $J_{nr,diff}$  değerlerinde sürekli artmaktadır. Sıcaklığın artması ile her üç modifikasyonda ve katkıların birlikte kullanılması durumunda  $J_{nr,diff}$  değerleri olumsuz etkilenmektedir. Bağlayıcılar 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesinde çok yüksek oranda elastik özellik göstermiş olduğundan M6 bağlayıcısı hariç tüm bağlayıcılar şartname gereksinimini sağlayarak ve dolayısıyla kalıcı deformasyonlara karşı hassas olmadığı belirlenmiştir. Bağlayıcılardan sadece M6 bağlayıcısı 88 °C'de %75'ten yüksek  $J_{nr,diff}$  değerleri vermektedir. Buna karşın saf bağlayıcı 70 °C'de bile %35 gibi çok düşük bir  $J_{nr,diff}$  değeri verse de 611 katkılı bağlayıcılar tekerlek izine en dirençli bağlayıcı olarak görünmektedir. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da ele alınmış ve mevcut  $J_{nr,diff}$  belirlenme yönteminin gerçeği yansıtmadığı belirtilmiştir.



Şekil 6. Bağlayıcıların  $J_{nr,diff}$  değerlerindeki değişim

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, modifiye bağlayıcıların gerilime bağlı davranışını incelemek için kontrol katkısız bağlayıcıya üç farklı katkı maddeleri eklenmiştir. Kullanılan katkı maddeleri arasında stiren-butadiene-stiren (SBS), 611 ve 701 polimerleri yer alıyordu. Dinamik kayma reometresi (DSR) cihazı kullanarak çoklu gerilme uygulaması sonrası sünme-elastik geri dönme (MSCR) testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen deneysel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Her üç modifikasyonda da katkı içeriğinin artması ile  $J_{nr}$  değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Katkı içeriğinin  $J_{nr}$  üzerindeki bu iyileştirme etkisi %2 SBS, %2 701 ve %2 611 gibi düşük katkı içeriğinde önemli bir şekilde meydana gelmekte daha sonra katkı içeriğinin artması ile bu iyileştirme etkisi azalarak devam etmektedir. Elastik geri dönme değerleri bütün sıcaklıklarda her üç modifikasyonda da katkı içeriğinin artması ile

artmaktadır. Bu artış SBS modifikasyonunda 58 °C ve 64 °C’de katkı içeriğinin artması ile sürekli meydana gelirken 70 °C ve 76 °C’de %4 katkı içeriğinden sonra çok fazla değişmemektedir. Düşük gerilme seviyesinde olduğu gibi yüksek gerilme seviyesinde de tüm modifiyeli bağlayıcılar sıcaklık artışı ile esnekliğini daha iyi bir şekilde koruyabilmektedir. SBS modifikasyonunda  $J_{nr\text{diff}}$  değerleri 58°C dışında tüm sıcaklıklarda katkı içeriği arttıkça  $J_{nr\text{diff}}$  değerlerinde artış görülmektedir. Sıcaklığın artması ile her üç modifikasyonda ve katkıların birlikte kullanılması durumunda  $J_{nr\text{diff}}$  değerleri olumsuz etkilenmektedir.

### Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) kapsamında gerçekleştirilmiştir. FÜBAP’ın MF.20.33 Araştırma Projesi’ne sağladığı mali destek için teşekkür ederiz. E.Y. ve M.Y. fikir sahibi ve deneyleri gerçekleştirdi. E.Y. ve M.Y. sonuçları yorumladı ve makaleyi yazdı.

### Kaynaklar

- [1] Atul Narayan SP, Murali Krishnan J, Little DN, Rajagopal KR. Mechanical behaviour of asphalt binders at high temperatures and specification for rutting. *Int J Pavement Eng* 2017; 18 (10): 916–927.
- [2] Delgadillo R, Cho DW, Bahia H. Nonlinearity of repeated creep and recovery binder test and relationship with mixture permanent deformation. *Transp Res Rec* 2006; 1962 (1): 2–11.
- [3] AASHTO. Standard specification for performance-graded asphalt binder. AASHTO 2021; AASHTO M 320–21.
- [4] Delgadillo R, Nam K, Bahia H. Why do we need to change  $G^*/\sin\delta$  and how?. *Road Mater. Pavement Design* 2006; 7 (1): 7–27.
- [5] D’Angelo J. Current status of superpave binder specification. *Road Mater Pavement Design* 2009; 10 (sup1): 13–24.
- [6] D’Angelo JA. The relationship of the MSCR test to rutting. *Road Mater Pavement Design* 2009; 10 (sup1): 61–80.
- [7] AASHTO. Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR) 2013; AASHTO: AASHTO TP 70.
- [8] Wasage TLJ, Stastna J, Zanzotto L. Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test. *Int Pavement Eng* 2011; 12 (6): 561–568.
- [9] Radhakrishnan V, Ramya Sri M, Sudhakar Reddy K. Evaluation of asphalt binder rutting parameters. *Constr Build Mater* 2018; 173: 298–307.
- [10] Walubita LF, Ling M, Pianeta LMR, Fuentes L, Komba JJ, Mabrouk GM. Correlating the asphalt-binder mscr test results to the hma hwtt and field rutting performance. *J Trans Eng Part B: Pavements* 2022; 148 (3).
- [11] Skronka G, Blascik M, Vacin O, Jasso M. Impact of shear stress levels on validity of MSCR tests. *Road Mater Pavement Design* 2022; 24 (7):1820–1836.
- [12] Domingos MDI, Faxina AL. Literature review of the multiple stress creep and recovery, performance-related test. *J Trans Eng Part B: Pavements* 2021; 147 (1): 03121001.
- [13] Wang D, Zhu J, Porot L, Cannone Falchetto A, Damen S. Multiple stress creep and recovery test for bituminous binders – influence of several key experimental parameters. *Road Mater Pavement Design* 20123; 24 (sup1): 290–308.
- [14] Zhou Z, Gu X, Jiang J, Ni F, Jiang Y. Nonrecoverable behavior of polymer modified and reclaimed asphalt pavement modified binder under different multiple stress creep recovery tests. *Transp Res Rec* 2018; 2672 (28): 324–336.
- [15] Sun Y, Wang W, Chen J. Investigating impacts of warm-mix asphalt Technologies and high reclaimed asphalt pavement binder content on rutting and fatigue performance of asphalt binder through MSCR and LAS tests. *J Clean Prod* 2019; 219: 879–893.
- [16] AASHTO. Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). AASHTO 2021; Test AASHTO M: 332–21.
- [17] Delgadillo R, Bahia HU, Lakes R. A nonlinear constitutive relationship for asphalt binders. *Mater Struct* 2011; 45 (3): 457–473.
- [18] Saboo N, Kumar P. A study on creep and recovery behavior of asphalt binders. *Constr Build Mater* 2015; 96: 632–640.
- [19] Masad EA, Huang CW, D’Angelo J, Little DN. Characterization of asphalt binder resistance to permanent deformation based on nonlinear viscoelastic analysis of multiple stress creep recovery (MSCR) test. *J Assoc Asphalt Paving Technol* 2009; 78: 535–566.
- [20] Schapery RA. On the characterization of nonlinear viscoelastic materials. *Polym Eng Sci* 1969; 9 (4): 295–310.
- [21] Sadeq M, Masad E, Al-Khalid H, Sirin O, Mehrez L. Linear and nonlinear viscoelastic and viscoplastic analysis of asphalt binders with warm mix asphalt additives. *Int J Pavement Eng* 2016; 19 (10): 857–864.
- [22] Liu H, Zeiada W, Al-Khateeb GG, Ezzet H, Shanableh A, Samarai M. Analysis of MSCR test results for asphalt binders with improved accuracy. *Mater Struct* 20121; 54 (2).
- [23] Luo X, Ling J, Li H, Zhang Y, Li Y. Nonlinear viscoelastoplastic kinetics for high-temperature performance of modified asphalt binders. *Mech Mater* 2023; 180: 104612.
- [24] Zhang L, Xing C, Gao F, Li T, Tan Y. Using DSR and MSCR tests to characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt. *Constr and Build Mater*. 2016; 127: 466-474.
- [25] Zhengda W, Dongdong G, Zihao J, Yanhua X. The performance evaluation of extracted asphalt binder from dry process produced rubber modified asphalt mixture. *Constr and Build Mater*. 2023; 401: 131864.
- [26] Yalcin E, Demirbag A. Effects of modified binders obtained from different polymers on conventional and rheological properties. *Constr and Build Mater*. 2022; 357: 129366.



## Anomaly Detection in Meteorological Data Using a Hierarchical Temporal Memory Model: A Study on the Case of Kazakhstan

Kürşat Mustafa KARAOĞLAN<sup>1</sup>, Oğuz FINDIK<sup>2</sup>, Erdal BAŞARAN<sup>3\*</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Karabük University, Karabük, Türkiye

<sup>3</sup> Department of Computer Programming, Vocational School, Agri Ibrahim Cecen University, Agri, Türkiye

(Geliş/Received: 25/01/2024;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Abstract:** In meteorology, which studies atmospheric events, data representing various properties such as temperature, rainfall, and wind speed are collected regularly over a certain period. Unexpected trends in the data may indicate that an abnormal situation is approaching. Therefore, time series (TS) data play an essential role in the early detection of potential meteorological risks. However, applying effective models by considering many complex parameters in performing accurate analysis and anomaly detection (AD) is an important criterion. In this study, machine learning-based AD is performed using a dataset containing meteorological data on different features collected between January 1, 2019, and June 30, 2023, for Kazakhstan, which has the ninth-largest surface area in the world. The Hierarchical Temporal Memory (HTM) model was used for AD, which can provide more accurate forecasts by modeling long-term dependencies and producing effective results in solving TS problems. Detected anomalies are reported at various levels depending on threshold values. In addition, to analyze the ADs more precisely, correlations are calculated using the Spearman model, which allows us to determine the strength and direction of the monotonic relationship between variables. The study's findings show that the HTM is an effective model for AD using TS data on meteorological features.

**Keywords:** Anomaly detection, time series, meteorological anomalies, machine learning, hierarchical temporal memory.

### Hiyerarşik Zamansal Bellek Modeli ile Meteorolojik Verilerdeki Anomalilerin Tespiti: Kazakistan Örneği Üzerine Bir Çalışma

**Öz:** Atmosferik olayları inceleyen meteorolojide, sıcaklık, yağış ve rüzgar hızı gibi çeşitli özellikleri temsil eden veriler belirli bir süre boyunca düzenli olarak toplanmaktadır. Verilerdeki beklenmedik eğilimler anormal bir durumun yaklaşmakta olduğunu gösterebilmektedir. Bu nedenle, zaman serisi verileri potansiyel meteorolojik risklerin erken tespitinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak doğru ve güvenilir analizlerin gerçekleştirilmesinde ve anormali tespitinde karmaşık birçok parametreyi göz önünde bulundurarak etkin modelleri uygulamak önemli bir kriterdir. Bu çalışmada, dünyanın en büyük dokuzuncu yüzölçümüne sahip Kazakistan için 1 Ocak 2019 ile 30 Haziran 2023 tarihleri arasında toplanan farklı özelliklerdeki meteorolojik verileri içeren bir veri seti kullanılarak makine öğrenmesi tabanlı anormali tespiti gerçekleştirilmiştir. Anormali tespiti için uzun vadeli bağımlılıkları modelleyerek daha doğru tahminler sağlayabilen ve zaman serisi problemlerinin çözümünde etkin sonuçlar üreten Hiyerarşik Zamansal Bellek (HTM) modeli kullanılmıştır. Tespit edilen anomaliler eşik değerlerine bağlı olarak çeşitli seviyelerde raporlanmıştır. Ayrıca, anormali tespitlerini daha hassas bir şekilde analiz etmek için, değişkenler arasındaki monotonik ilişkinin gücünü ve yönünü belirlememizi sağlayan Spearman modeli kullanılarak korelasyonlar hesaplanmıştır. Çalışmanın bulguları, HTM modelinin meteorolojik özelliklere ilişkin zaman serisi verilerinin kullanıldığı AD problemlerinde etkin bir araç olduğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Anormali tespiti, zaman serileri, meteorolojik anomaliler, makine öğrenmesi, hiyerarşik zamansal bellek.

## 1. Introduction

Time is a non-modifiable intrinsic factor that plays an important role in the human brain's learning process [1]. This intangible factor can be found in many different contexts, ranging from measurements of natural phenomena such as meteorology to artificial systems such as stock markets and robotics, and it can be found in real-world problems. The evaluation and effective modeling of phenomena with their temporal components [2] help to achieve more accurate predictions and advances in various fields of study and practical applications. In this context, temporal data allow in-depth data analyses thanks to the opportunities to capture the dynamics and evolving patterns inherent in complex phenomena [3]. Time series (TS), on the other hand, represent an ordered and temporally indexed collection of data points, usually obtained at regular intervals [4] [5]. TS are essential in various academic disciplines as they are numerical, continuous, and high dimensional. Each time point can often be associated with more than one variable or feature and needs to be constantly updated with new observations. In

\* Sorumlu yazar: [erdalbasaran085@gmail.com](mailto:erdalbasaran085@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0001-9830-7622, <sup>2</sup>0000-0001-5069-6470, <sup>3</sup>0000-0001-8569-2998

this way, TS allows researchers to analyze and discover emerging trends, non-specific patterns, and existing relationships [6].

Time series analysis (TSA) has been an active research topic for researchers for many years [7] [8]. Researchers have conducted a great deal of research in areas covering various aspects such as TSA [9], searching for subsequences, segmentation metrologies [10], and dimensionality reduction techniques [11]. Early work in the literature attracted a great deal of attention from the database and pattern recognition communities. TSA was observed to contribute critical insights in a variety of domains while at the same time contributing to a better understanding of the broad scope of TSA and the development of techniques, thereby increasing the usability of these techniques in different contexts [6] [12]. Currently, TSA is widely used in fields ranging from cybersecurity [13] to finance [14], economics [14], and environmental sciences [13] [14] to perform subtasks such as revealing valuable features, making reliable predictions, and guiding decision-making processes. Furthermore, researchers have gained the ability to perform anomaly detection (AD) [15], outcome prediction, examine relationships between variables, analyze dependencies, patterns, and trends in TS, and evaluate the effects of various factors using statistical or Machine learning (ML)-based methods such as Hierarchical Temporal Memory (HTM). In this context, researchers can successfully perform basic tasks such as classification [16] [17], and clustering [18] using these techniques [2].

Anomalies refer to deviated, discordant, or outlier values that do not conform to the expected normal [19]. AD is one of the challenging tasks of Data Mining [19]. It is the process of detecting or identifying data points, anomalies, events, and components that deviate from the expected pattern [20]. Three main types of anomalies are usually identified in the literature [21]. The first type is the point anomaly, which results from the significant deviation of a data sample from the overall dataset [22]. The second type is contextual anomalies, which exhibit anomalous behavior within a specific context. The third type is collective anomalies, which refer to similar data samples that exhibit anomalous behavior concerning the entire dataset [23]. Classical methods for AD, such as linear models [24], distance-based methods [25], and support vector machine [26], are still valid. However, the presence of multidimensional data may impose limitations, and difficulties may arise when dealing with large and complex systems due to the need for labeled anomalies. Furthermore, TSA can present additional challenges as it considers sequencing and cause-effect relationships along the time axis. Researchers have developed various methods to overcome these challenges [27].

Accurate detection of anomalies fulfills essential roles in decision-making, risk management, predictive maintenance, and early warning systems [28]. AD in TS problems is of great interest due to its practical applications and potential impact on various industries. Such AD helps organizations proactively approach critical problems, minimize losses, and improve operational efficiency. In the era of big data and increasing digitalization, effectively detecting anomalies in TS data is crucial [29]. Early detection of outliers in TS data can play a critical role in preventing costly failures and mitigating potential risks [30]. Identifying and flagging anomalous patterns in TS is critical in detecting fraudulent activities, identity or passport documents, insurance claims, and healthcare fraud [31], predicting system failures, and ensuring the smooth operation of complex systems [32].

AD in TS data is categorized as univariate and multivariate based on the input data [33] [34]. Univariate AD focuses on identifying deviations of individual variables from long-term patterns and identifies outliers according to the general distribution or discriminant model. On the other hand, multivariate AD problems involve multiple variables observed at each timestamp or time instant, and this type of AD considers the relationships and interactions between variables, which is a more complex process than univariate analyses [35]. Anomaly studies aim to detect point, contextual, collective, or pattern anomalies [36].

Traditional approaches in AD research usually include statistical, classification-based, clustering-based, and information-theoretic methods, such as PCA, Support Vector Machines, k-nearest Neighbor algorithm, and various correlation analysis techniques [28] [37]. However, these approaches can be needed to handle system dynamics that change over time, making it challenging to characterize anomalous contexts accurately. In recent years, successful results have been achieved in detecting complex contextual anomalies with dynamic and time-varying features, such as RNN-based architectures. Moreover, some works in the literature have provided an overview of semi-supervised, unsupervised, and hybrid DF techniques and discussed their advantages, disadvantages, and computational complexities [38]. In particular, other research focuses on deep learning-based AD approaches such as Boltzmann machines, Autoencoders, and RNNs [39]. In addition, AD has an essential role in many fields; there are various studies in the literature in this field, for example, in cyber security [40] [41], fraud detection [42], medical field, industrial damages, images, textual data, sensor networks, geochemical data processing [43], and various ML and non-ML techniques as well as statistical and spectral sensing methods for AD in discrete/symbolic sequences [28] [44] [45] in the work of Nassif et al., several ML techniques used in AD as independent models in various applications are presented hierarchically under the categories: classification, ensemble analysis,

optimization, rule-based systems, clustering, and regression. These methods can be used as independent models [44].

DL approaches differ from surface ML algorithms in that they can perform feature extraction and classification tasks simultaneously. Furthermore, these approaches differ regarding integrated functionalities and resource requirements, such as data dependency and hardware dependency [46]. In the field of AD, many DL-based approaches have been proposed, especially in intrusion detection in cyber security [39] [47] [48]. Various aspects of using DL techniques have been discussed in detail. Multivariate AD involves multiple variables observed at the same timestamp or instant [34]. In such problems, multiple data points correspond to different variables at each time step. Such analyses present additional challenges compared to univariate analyses, as the relationships and interactions between variables need to be considered to develop an effective AD and modeling approach. Although various methods are presented in the literature for detecting anomalies in TS data, most of these methods primarily focus on univariate TS approaches [49]. Another essential approach in AD studies is HTM. HTM is a biologically based ML technique that mimics the architecture and functioning of the neocortex [19]. Notable features of HTM include sparsity, hierarchy, and modularity. The method uses three main components, encoder, spatial pooling (SP), and temporal memory (TM), to efficiently discover patterns and contexts in TS data. HTM can learn from continuously evolving data without the need for labeled data, which increases the usability of HTM in scenarios where manual labeling is difficult or costly. The continuous learning capability allows the model to adapt to changing data structures and effectively identify new anomalies [50] [51]. Furthermore, HTM can store, remember, and predict patterns in an aggregated manner, which provides the ability to anticipate the next pattern occurrence.

AD can produce important outputs in various fields, including meteorology, where it plays an essential role in identifying irregular patterns, outliers, and anomalies in TS data. In particular, meteorologists are keenly interested in identifying anomalies in weather data to predict future outcomes [52]. Accurately detecting anomalies in meteorological data can contribute to critical disaster management, agricultural planning, and environmental monitoring decisions. For this reason, accurate and reliable analysis of meteorological data is of great importance for weather forecasts and climate change studies. Detection of anomalies in these analyses is critical in warning of extreme weather events and other unexpected situations. In addition, integrating AD methods into meteorological research offers many benefits, such as improving weather forecast accuracy, monitoring climate change dynamics, and assisting in disaster management.

This study aims to develop a practical and sensitive approach for AD on TS data of meteorological events occurring from 1 January 2019 to 30 June 2023 in Kazakhstan, the ninth largest country in the world in terms of area. In this study, an AD approach based on HTM, which is among the state-of-the-art approaches known for its effectiveness in AD tasks [53] performed on TS problems, is implemented. AD performances are evaluated by considering the correlations of features. HTM, which can be applied unsupervised by eliminating the need for labeled data, has shown effective performance on TS data since it is designed in a hierarchical structure to capture complex temporal patterns. The publicly available dataset used in the study includes comprehensive meteorological data, including temperature, precipitation, cloud cover, atmospheric pressure, and wind [54]. In addition, this study contributes to developing methods for the sensitive, accurate, and reliable detection of unusual anomalies in meteorological TS data. The study focuses on developing an advanced and region-specific AD system in this context. It has the potential to assist in monitoring climate change dynamics and effective disaster management.

The contributions of the paper presented below are summarized:

- An efficient and sensitive approach for AD in meteorological TS data of Kazakhstan, covering the period from January 2019 to June 2023, is developed.
- The applicability, performance, and effectiveness of HTM, a state-of-the-art unsupervised ML technique for AD, are presented.
- Univariate AD was performed on meteorological features and output performances were evaluated.
- Using a comprehensive data set, various meteorological parameters such as temperature, precipitation, cloud cover, atmospheric pressure, and wind properties are evaluated in terms of anomaly.
- A sensitive, accurate, and robust AD system is proposed, which contributes to monitoring climate change dynamics and effective disaster management.
- Thresholds are used to define the level of anomalies, and the Spearman correlation method was used to measure the strength and direction of the monotonic relationship between variables to improve anomaly sensitivity. In addition, this study is among the pioneering studies on HTM-based AD tasks on meteorological data.

This paper is organized into five main sections to contribute to a comprehensive study of the AD task on meteorological TS data using HTM. The study is organized according to the following sections: The second section, methodology, presents the HTM, its components, and the applied correlation method. The details of the proposed approach are explained in detail in the third section. The fourth section presents the experimental studies, the dataset and hyperparameters used, HTM-based anomaly results, correlation analysis results and findings. The last section is reserved for discussion and conclusion.

## 2. Methodology

This section provides an overview of the methodologies used to implement the proposed approach, focusing on the HTM approach and correlation techniques. The correlation techniques help in the meaningful interpretation of the output analyses of HTM conducted univariately to address the AD analysis process effectively. Thus, correlation methods effectively assess the interrelationships and dependencies in the data and provide an accurate and reliable handling of HTM outputs.

### 2.1. HTM and components

In statistical methods, a model is generated based on the data obtained from normal behavior. Then, the conformity of new samples to the model is performed by statistical inference test. According to the test results, the samples with a low probability of being generated from the learned model are removed as outlier samples [28]. In ML methods, labeled data are needed to solve anomaly classification problems. Although ML approaches have the potential to exhibit high performance in domain-specific AD problems, factors such as labeling cost and labeling accuracy of the data should be considered. However, distinguishing data exhibiting anomalous behavior in large volumes of flow data and parsing model input data sets may not produce reliable results. Unlike statistical and ML approaches, HTM, an unsupervised ML approach, can continuously learn evolving data models with the hierarchical components in its architecture and capture the temporal context efficiently. In addition, HTM has various advantages, such as applying to dynamic and complex data models, operating in real-time, being adaptable to AD scenarios involving univariate or multivariate analyses, and being robust to noise [19]. HTM is a detailed computational theory that mimics the working principles of the neocortex. HTM incorporates time-based learning techniques for capturing and recalling spatial and temporal patterns [55]. The primary data structure in HTM is sparse distributed representation (SDR) [19] [56] [57]. The HTM methodology for processing TS data includes essential components such as Encoder, Spatial Pooling (SP), and Temporal Memory (TM) [58]. The encoder part normalizes the data by converting the input data into binary representations called fixed-length SDRs [59]. This stage prepares the data for further processing. SP ensures that the encoded data maintains a constant sparsity, typically not exceeding 2%, to preserve essential features. The TM stage focuses on recognizing and extracting temporal information patterns after the SP step, thus providing a higher-level representation [60] [61]. Moreover, the other component in HTM represents the task of classification [62]. However, the classifier process is not included in this study. Figure 1 presents a visual representation of the HTM pipeline designed to handle AD.

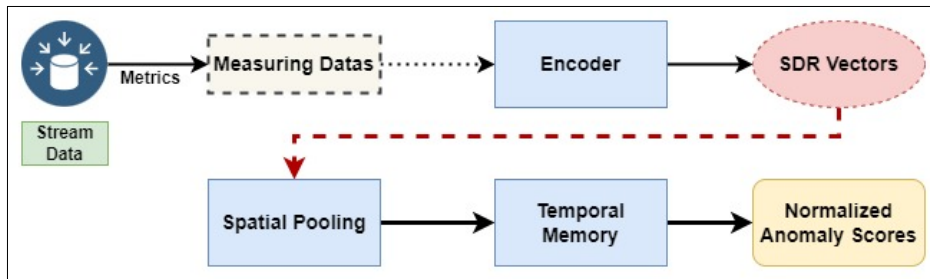


Figure 1. A general HTM pipeline for detecting anomalies in TS data [15]

In HTM, which takes an approach similar to the Hebbian learning rule [63], the temporal pattern learning process first captures spatial patterns between input bits by frequently identifying bits that occur together. When these bits overlap, mini columns are activated. A set of active mini columns represents a spatial pattern. The HTM then starts to learn the transitions between these spatial patterns. Active cells connect with recently active cells via distal synapses and are pattern recognizers to predict future patterns. When the distal basal segment recognizes a memorized pattern, it depolarizes the cell, making it predictive. If the expected input occurs, the cell correctly predicts and activates; if an unexpected input arrives, all cells within the selected mini columns collectively

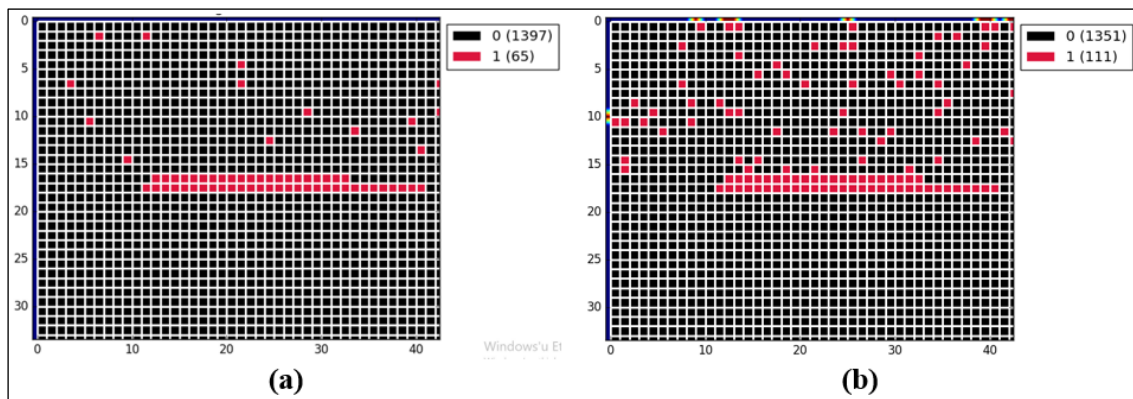


recognize it as a new pattern and activate. This collective process enables HTM to store, retrieve, and predict subsequent patterns smoothly [19] [64].

### 2.1.1. Encoder

The encoder is responsible for normalization by transforming the input data into binary representations called fixed-length SDRs, making them suitable for the input forms of other components. SDRs are the main data type used in the cortex and is used throughout HTM systems. SDRs match memory space representations in terms of mismatch probability, robustness to noise, subsampling, and classification of vectors and combinations [59]. The encoder process is performed according to the fundamental parameters such as the length of the SDR vector to be generated, the number of open bits (value of 1) and the sparsity rate. SDRs generated with encoders designed with the right parameters have a strong potential for high performance in learning temporal sequences. In the HTM, there is a sequence of SDRs that can be designed differently depending on the specific purposes with various functions in different parts of the neuron and in the algorithm structure [57]. SDRs differ from standard computer notation, such as ASCII, because they are encoded for direct representation. They consist of an extensive sequence of bits, mostly zeros and a few ones, and are, therefore, sparse. In addition, each bit in an SDRs has semantic properties, so if two SDRs have more bits of overlapping value, the two SDRs have comparably similar meanings at different proportional values. Consequently, the first step in using an HTM system is to convert a data source into an SDRs using an encoder that determines which output bits will have a value of one or zero for a given input [65].

Figure 2 (a) shows the SDR vector produced by processing the time and the first feature together on the dataset used with the encoder whose parameters are set. Figure 2 (b) shows the SDR vector that includes time and all features of the dataset, representing the first input of the dataset. In addition, the 1-valued bits of the presented SDR vectors are shown in red, and the 0-valued bits in black color, and their numerical occurrence numbers are also presented.



**Figure 2.** (a) SDR produced by processing the timestamp and the first feature. (b) SDR containing all features of the first input of the timestamp dataset, representing the first input.

### 2.1.2. Spatial pooling (SP) and temporal memory (TM)

The SP phase ensures that the encoded data maintains a constant sparsity, typically not exceeding 2%, to preserve essential features. The TM phase focuses on recognizing and extracting temporal information patterns after the SP step, thus providing a higher-level representation [55] [56]. Moreover, the other component in HTM represents the classification task [62]. However, the classifier process is not included in this study. SP, responsible for SDR encoding of binary input data, combines competitive Hebbian learning rules and homeostatic excitability control [66]. In SP, binary vectors in the input space are transformed into sparse sequences. The SP ensures that the sparsity and overlap of the input space of the HTM are preserved. Therefore, similar input data have high overlap, while different input data have low overlap [67]. The bits (columns) that are active after the SP task to represent the first input of the dataset used in this study are given in Figure 3.

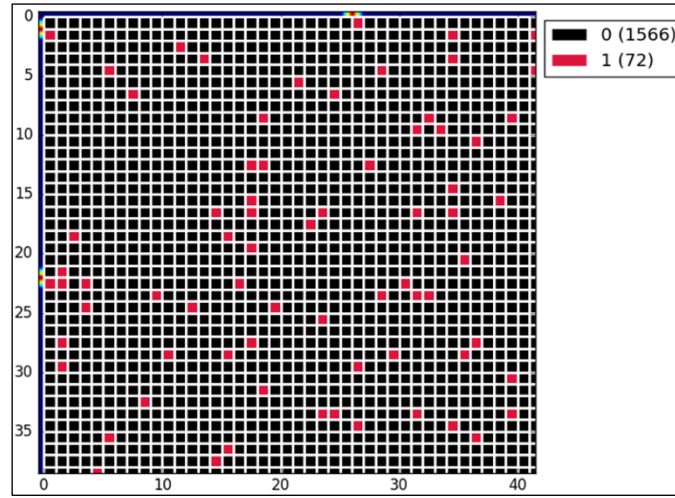


Figure 3. Active columns after SP process.

The TM phase focuses on recognizing and extracting temporal information patterns after SP phase, thus providing a higher-level representation [60] [61]. In this way, it learns from the SDR sequences generated over time by the SP and predicts the next incoming pattern based on the temporal context of each input. The TM task follows the SP and determines the current active temporal state. The working principle of TM is to activate cells in columns, make them predictable and update the persistence of synapses [68].

## 2.2. Spearman's correlation

Correlation analysis is a statistical method widely used to summarize scientific research data. Correlation analysis is used to determine whether there is a relationship between two variables and to assess the degree of interdependence by measuring the strength of the relationship ( $r$ ) [69]. Regression approaches seek to express the specific form of the relationship between selected values of one independent variable and the means of all corresponding values of the second dependent variable. In this aspect, correlation differs from regression, but correlation is the basis of regression theory [70] [71]. The correlation coefficient, denoted as  $r$ , theoretically ranges between +1 and -1. When interpreting correlations, 0 indicates no linear relationship, +1 indicates a perfect positive linear relationship, and -1 indicates a perfect negative linear relationship. Furthermore, values between 0 and 0.3 (or -0.3) represent a weak positive (negative) linear relationship, values between 0.3 and 0.7 (or -0.7) indicate a moderately positive (negative) linear relationship, and values between 0.7 and 1.0 (or -0.7 and -1.0) indicate a strong positive (negative) linear relationship. The correlation coefficient assumes linearity, which makes it reliable for linear relationships but not practical for non-linear relationships and requires careful consideration of linearity assumptions when interpreting data [72].

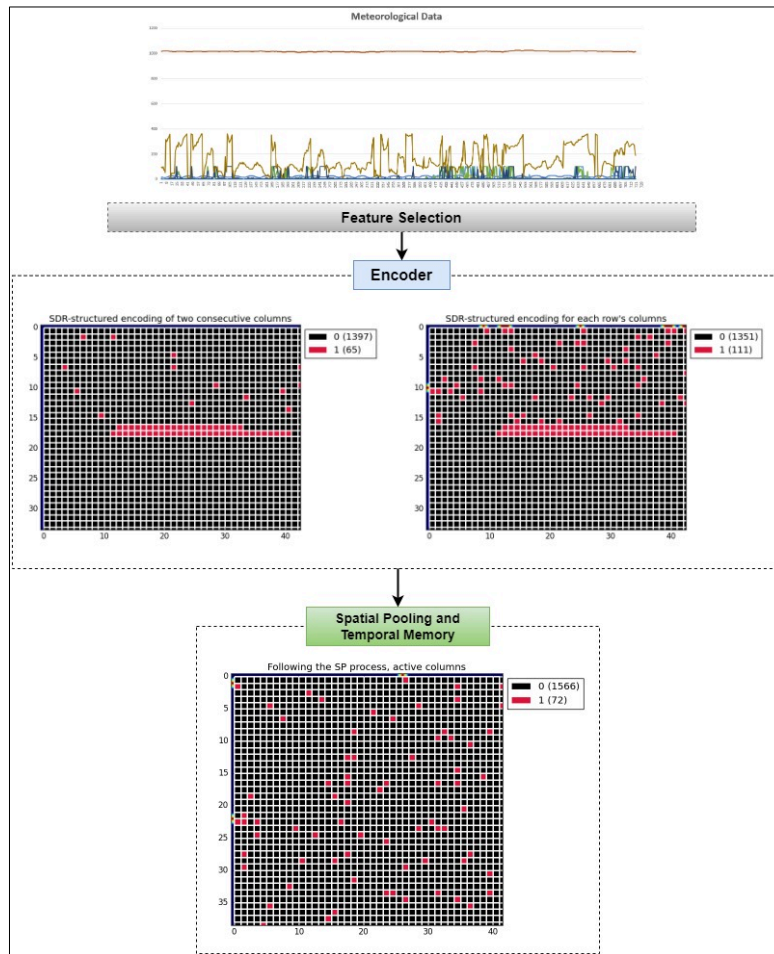
In statistics, Spearman's rank correlation coefficient, denoted  $\rho$  (rho) or sometimes  $r_s$ , is named after Charles Spearman [73]. It is a nonparametric metric used to measure rank correlation and measures the statistical dependence between the ranks of two variables. This coefficient assesses how effectively a monotonic function can characterize the relationship between two variables. The Spearman correlation between two variables is essentially the Pearson correlation applied to the rank values of these variables. While Pearson correlation is concerned with assessing linear relationships, Spearman correlation focuses on monotonic relationships, whether linear or not. Without repeated data values, a reliable Spearman correlation of +1 or -1 is obtained when each variable is an optimal monotonic function of the other. The Spearman coefficient is suitable for both continuous and discrete ordinal variables. It is important to note that Spearman's  $\rho$  and Kendall's  $\tau$  can be seen as exceptional cases of a more general correlation coefficient, reflecting their versatility in various statistical applications [74] [75]. In line with the information presented above, Spearman's correlation was applied to statistically examine the relationships between features in this study.

$$p = 1 - [(6 * \sum d^2) / (n * (n^2 - 1))] \quad (1)$$

In Equation 1,  $p$  represents Spearman's rank correlation coefficient.  $\sum d^2$  is the sum of squared differences between the ranks of the corresponding data pairs.  $n$  represents the number of data pairs compared.

### 3. Proposed Approach

In this study, the pipeline for the approach developed for performing AD on meteorological data with the HTM approach is presented in Figure 4. According to this structure, the data is considered as a whole and prepared as separate inputs by selecting features according to time information to transform them into a format suitable for the inputs of the ML model. The prepared input data were transformed into SDR vectors and prepared for the SP stage. Thus, the data were transformed into sparse sequences, and temporal information patterns were obtained. Overlaps were also detected with the SP. In the next phase, AD was performed by training the dataset with a hybrid network model that predicts the next model based on the temporal input. Then, each input was used in the TM phase to perform AD. Figure 3 shows the encoder outputs of the input data as described in Figure 2 and Figure 3. In addition, the parameters of each HTM component presented in Figure 4 were fine-tuned and applied. Information about the parameters is presented in detail in the sections on the experimental studies.



**Figure 4.** (a) SDR generated by processing only the first feature with the timestamp. (b) SDR containing all features of the first input of the timestamp dataset.

### 4. Experimental Studies

In this section, correlation calculations and evaluations are presented to analyze the relationships between features in the experimental setting, results, and interpretation of outputs for AD experiments performed with HTM.

## 4.1. Experimental Setting

### 4.1.1. Dataset

For the detection of anomalies, a dataset [54] consisting of 11 features and data from 1642 days is used in this study. For all features in the dataset, measures of central tendency such as mean ( $\mu$ ) and median, as well as measures of dispersion such as maximum (max), minimum (min), and standard deviation ( $\sigma$ ), are calculated and presented. The dataset was reorganized by calculating daily means or sums of hourly temperature (temp), rainfall (r), snowfall (s), total\_cloud (t\_c), high\_level\_cloud (h\_c), mid\_level\_cloud (ml\_c), low\_level\_cloud (l\_c), pressure (pr), wind\_speed (w\_s), wind\_direction (w\_d) and turbo\_wind (t\_w). In addition, p-values were calculated separately to assess the statistical significance of the data and to perform regular distribution tests to determine whether each attribute was normally distributed. Since the p-values for each attribute in the table were calculated below the generally accepted threshold value of 0.05, it was determined that it did not have a normal distribution according to the condition presented and expressed with a TRUE value. In addition, as indicated in Table 1, the daily values of some features were calculated by averaging, and the daily values of some features were summed.

**Table 1.** Features and statistical details about the dataset used [54].

Date Range		January 1, 2019- June 30, 2023									
# Samples		1642									
# Features		11									
Averaged features		[temp], [t_c], [h_c], [ml_c], [l_c], [pr], [w_s], [w_d], [t_w]									
Summed features		[r],[s]									
		$i \in \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11\} \rightarrow S_i$									
Type	temp (°C)	r (mm)	s (mm)	t_c (%)	h_c (km)	ml_c (km)	l_c (km)	pr (hpa)	w_s (m/s)	w_d (degrees)	t_w (m/s)
$\mu$	12.7	1.3	0.1	46.4	18.7	29.2	35.2	1017.4	3.2	198.4	5.0
median	12.2	0.0	0.0	48.3	9.7	22.5	30.2	1017.8	2.7	201.8	4.2
max	30.4	49.2	18.3	100.0	98.9	100.0	100.0	1041.5	13.5	344.9	21.3
min	-4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	977.1	0.7	54.2	1.0
$\sigma$	7.1	3.3	0.7	31.9	21.4	28.6	30.8	8.4	1.8	60.2	2.7
p value p<0.05	~0, True	0, True	~0, True	~0, True	~0, True	~0, True	~0, True	~0, True	~0, True	0, True	0, True

A normal distribution test is a statistical procedure used to determine whether a data set conforms to a normal distribution, also known as a Gaussian distribution. Normality tests assess how closely data distribution conforms to the theoretical characteristics of a normal distribution, such as symmetry and specifically associated mean and standard deviation values. Commonly used normality tests include the Kolmogorov-Smirnov test, the Shapiro-Wilk test, the Anderson-Darling test, and graphical methods such as the Q-Q plot. These tests are essential in statistical analysis as they enable the selection of appropriate statistical techniques and help the reliability of statistical inferences [76] [77] [78]. This study used the Kolmogorov-Smirnov technique to calculate the regular distribution tests for the characteristics.

### 4.1.2. Hyperparameters

Table 2 presents the hyperparameters adapted for the AD task in the HTM model. Each table row introduces hyperparameters related to a different component of the HTM framework, namely the Encoder, SP, and TM. In this context, Table 2 shows the configuration settings required to implement the HTM model with optimal performance in the AD context, separating the hyperparameters according to each HTM component.

**Table 2.** Hyperparameters for the applied model.

<b>Encoder</b>	resolution: 0.88, size: 700, timeday: 30,1, weekend:21, sdralpha (predictor):0.1
<b>SP</b>	boostStrength: 3.0, columnCount: 1638, localAreaDensity: 0.04, potentialPct: 0.85, synPermActiveInc: 0.04, synPermConnected: 0.1, synPermInactiveDec: 0.006
<b>TM</b>	activationThreshold: 17, cellsPerColumn: 13, initialPerm: 0.21, maxSegmentsPerCell: 128, maxSynapsesPerSegment: 64, minThreshold: 10, newSynapseCount: 32, permanenceDec: 0.1, permanenceInc: 0.1, anomaly period: 1000

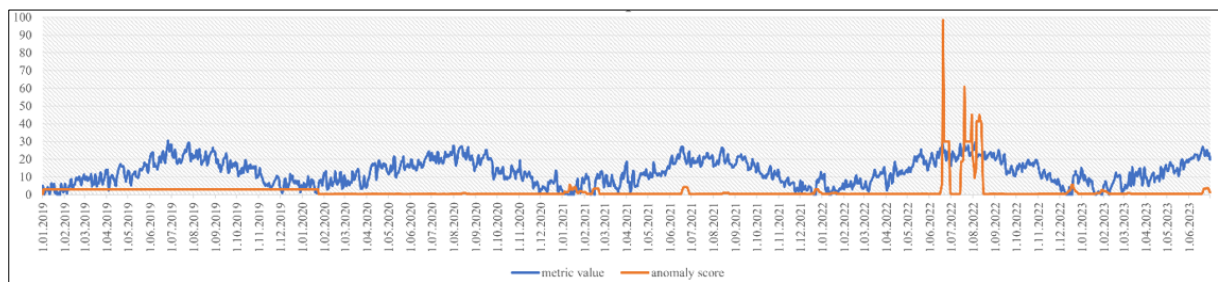
## 4.2. Experimental results

This section includes HTM-based anomaly results with graphs for each feature. In addition, Spearman correlation results are also presented to evaluate the anomaly outputs more precisely by determining the strength of the relationship between the features.

### 4.2.1. Results of HTM-based AD Approach

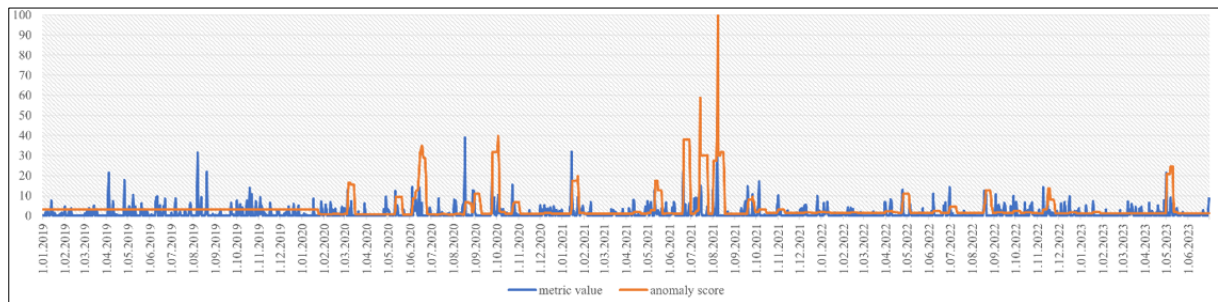
This section presented the results of the experimental studies to detect significant anomalies from typical climate models using various meteorological features with the HTM approach. The figures below (Figures 5-15) show the anomaly scores and the metric values for each meteorological feature of interest.

Figure 5 shows the anomaly scores and metric values for the Temperature feature. Notable high-level anomalies occurred on June 20, 2022, and July 20, 2022, indicating sudden temperature increases. In addition, moderate anomalies were observed on 13.07.2022 and several dates in August 2022, highlighting significant deviations from expected temperature trends.



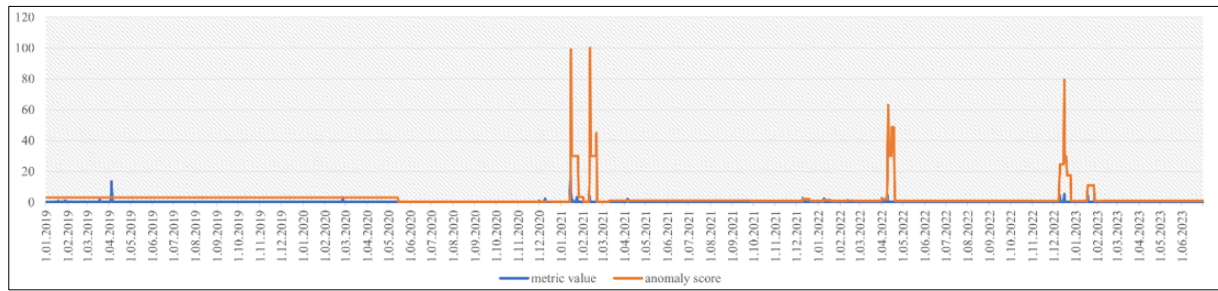
**Figure 5.** Plot of anomaly scores and metric values for the temperature feature.

Figure 6 shows the anomaly scores for rainfall and the resulting metric values. High-level anomalies were detected on August 8, 2021, and July 14, 2021, and indicate anomalous precipitation events. Moderate anomalies were also recorded, indicating significant changes in precipitation patterns, especially on August 7, 2022, and April 15, 2022.

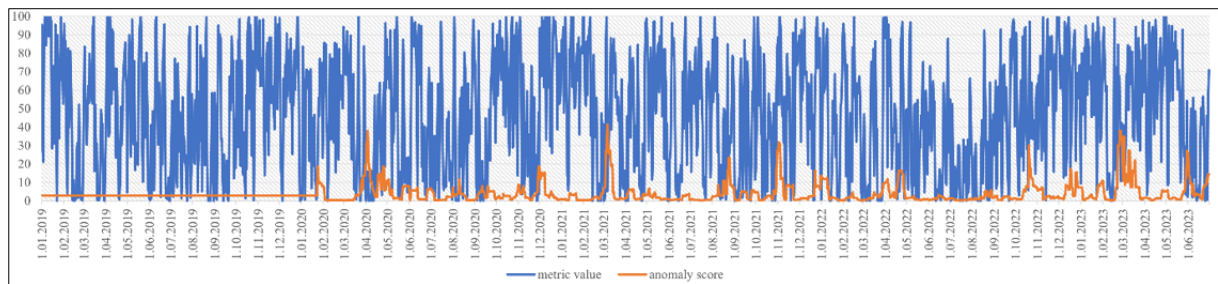


**Figure 6.** Plot of anomaly scores and metric values for the rainfall feature.

Figures 7 and 8 represent Snowfall and Total Cloud features, respectively. Snowfall anomalies were observed on February 11, 2021, January 15, 2021, December 16, 2022, and April 10, 2022. Total Cloud anomalies were relatively sparse, with only moderate anomalies detected on March 6, 2021.

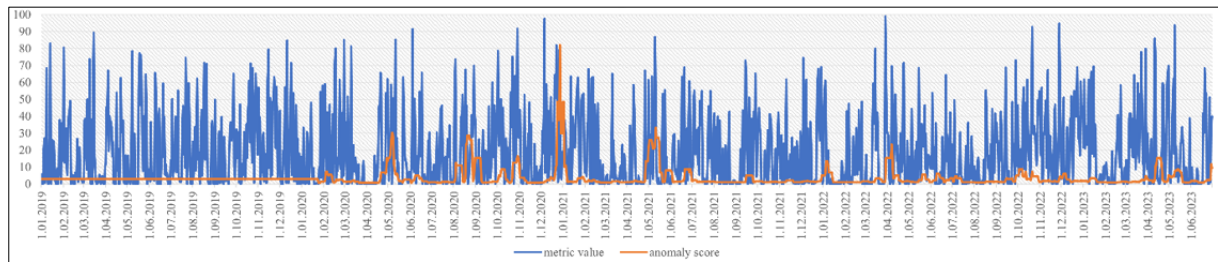


**Figure 7.** Plot of anomaly scores and metric values for the snowfall feature.



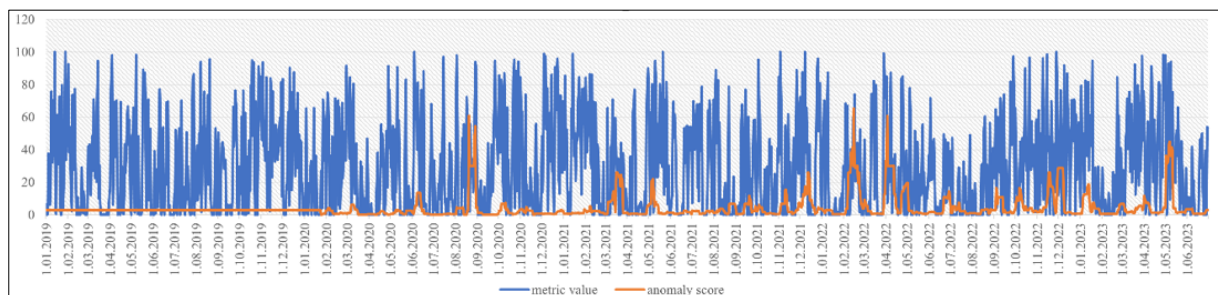
**Figure 8.** Plot of anomaly scores and metric values for the total cloud feature.

Figure 9 shows anomalies in the High Cloud feature, with high-level anomalies recorded on December 28, 2020. The mid-level anomalies were also spread over various dates in 2020 and 2021, highlighting the continuous deviations in the high cloud patterns.

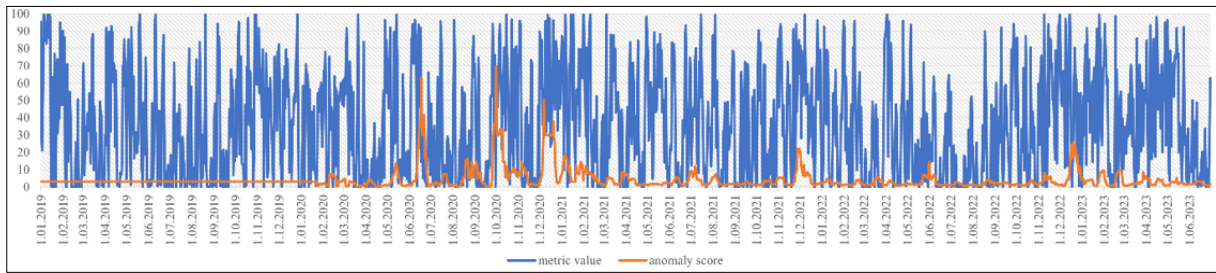


**Figure 9.** Plot of anomaly scores and metric values for the high-level cloud feature.

Figures 10 and 11 show the anomalies in the Mid-level Cloud and Low Cloud features, respectively. For the Mid-level Cloud, significant high-level anomalies occurred on February 15, 2022, August 20, 2020, April 3, 2022, and August 29, 2020. The Low Cloud, on the other hand, showed high-level anomalies on October 1, 2020, and June 18, 2020. Mid-level anomalies were also observed to be spread over various dates.

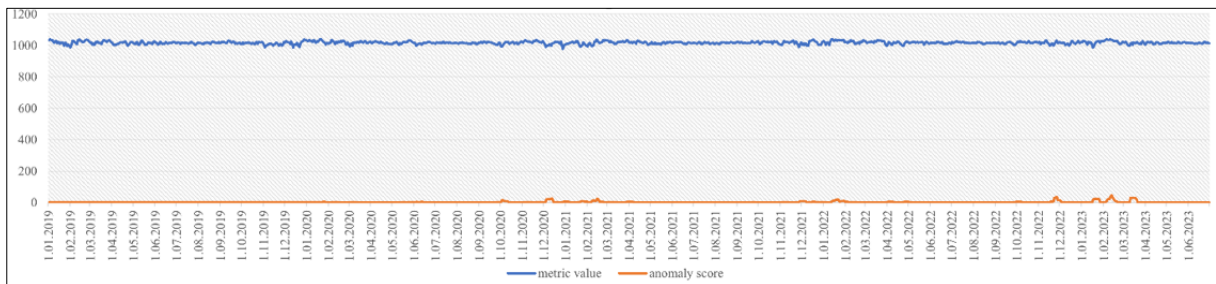


**Figure 10.** Plot of scores and metric values for the mid-level cloud feature.



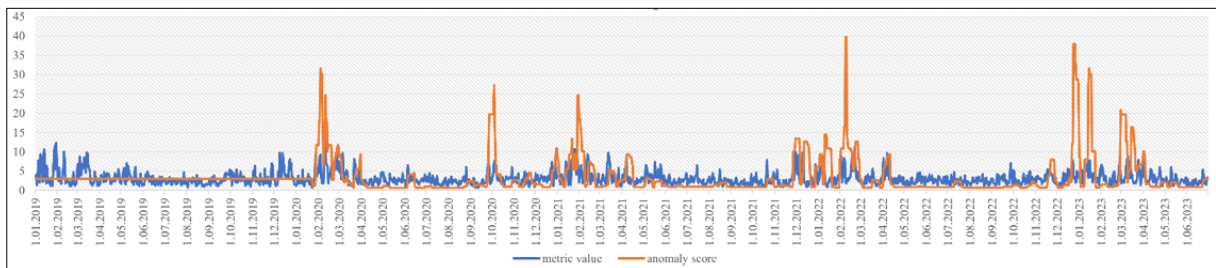
**Figure 11.** Plot of anomaly scores and metric values for the low-level cloud feature.

Figure 12 represents the results of AD in the pressure feature. No high-level anomalies were observed in the pressure feature. However, there is a moderate anomaly on February 12, 2023.

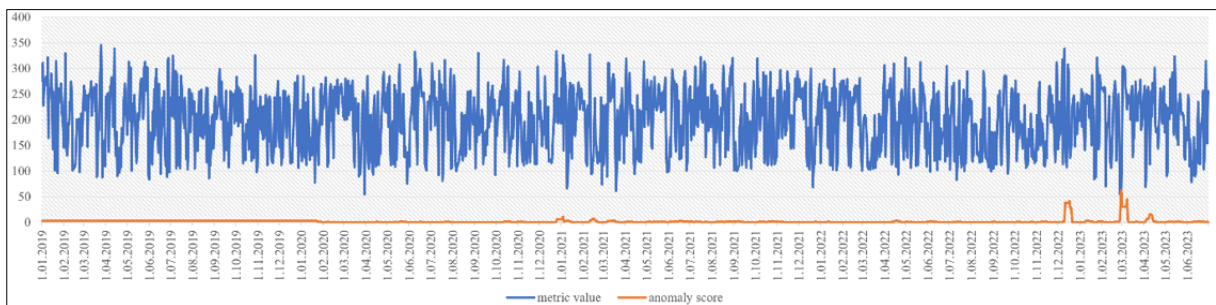


**Figure 12.** Plot of anomaly scores and metric values for the pressure feature.

Figure 13 represents wind speed, showing the absence of medium- and high-level anomalies and indicating consistent wind speed trends. In contrast, Wind Direction (Figure 14) exhibited high-level anomalies on February 28, 2023, medium-level anomalies on December 17, 2022, and February 27, 2023, indicating significant changes in wind direction patterns.

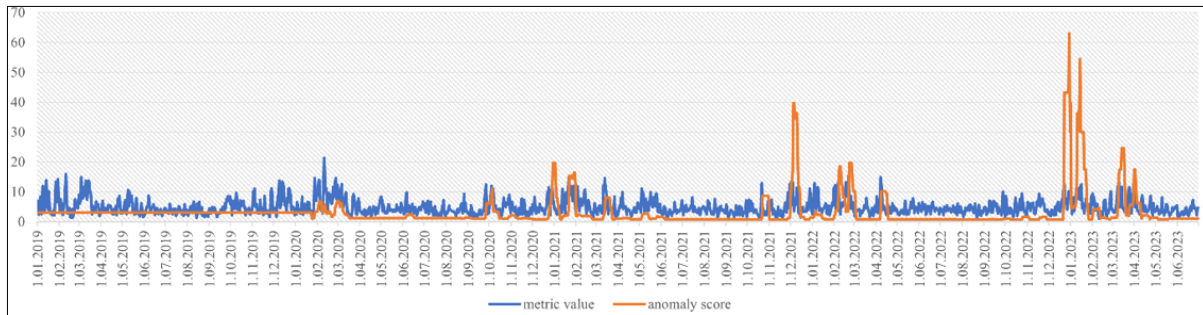


**Figure 13.** Plot of anomaly scores and metric values for wind speed feature.



**Figure 14.** Plot of anomaly scores and metric values for wind direction feature.

Finally, Figure 15 focuses on turbo wind, showing high-level anomalies on December 30, 2022, and January 14, 2023. Mid-level anomalies extend to various dates in late December 2022, revealing anomalous wind behavior.



**Figure 15.** Plot of anomaly scores and metric values for the turbo wind feature.

Table 3 summarizes the high and medium AD results obtained from the HTM-based AD method for various meteorological features. These features include Temperature, Precipitation, Snowfall, Total Cloud, High-level Cloud, Mid-level Cloud, Low-level Cloud, Pressure, Wind Speed, Wind Direction, and Turbo Wind. The table is divided into three columns: "Characteristics," "High-Level Anomaly Dates," and "Medium-Level Anomaly Dates." Anomaly levels are normalized between 0 and 100.

**Table 3.** Dates for high and medium anomalies obtained with the HTM-Based AD approach for each feature.

Features	Anomaly Dates	
	High Level	Medium Level
Temperature	20.06.2022	30.07.2022
	20.07.2022	10.08.2022
		6.08.2022
		7.08.2022
		8.08.2022
		9.08.2022
		11.08.2022
Rainfall	8.08.2021	7.08.2021
	14.07.2021	15.04.2022
Snowfall	11.02.2021	16.04.2022
	15.01.2021	17.04.2022
	16.12.2022	18.04.2022
Total Cloud	10.04.2022	20.02.2021
	None	6.03.2021
High-level Cloud	28.12.2020	24.12.2020
		27.12.2020
		1.01.2021
		2.01.2021
		25.12.2020
Mid-level Cloud	15.02.2022	28.08.2020
	20.08.2020	7.05.2023
	3.04.2022	6.05.2023
	29.08.2020	13.02.2022
Low-level Cloud		10.05.2023
	1.10.2020	7.12.2020
	18.06.2020	21.06.2020
Pressure		22.06.2020
	None	12.02.2023
Wind Speed	None	None
Wind Direction	28.02.2023	8.03.2023
		17.12.2022
		27.02.2023
Turbo Wind	30.12.2022	29.12.2022
	14.01.2023	23.12.2022
		24.12.2022
		25.12.2022
		26.12.2022
		27.12.2022
	28.12.2022	



Thresholds of 60 for high anomaly level and 40 for medium anomaly level were used. The table provides examples of high and medium anomaly dates detected using the HTM-based AD approach for each meteorological feature. These dates are listed in descending order of the anomaly scores calculated for each feature. Notably, some meteorological features have multiple high and mid-level anomaly dates, indicating periods of significant deviation from their expected behavior. In contrast, total cloud, pressure, and wind speed do not have any high-level anomalies recorded during the observed period. However, this does not mean that low-level anomalies did not occur. The findings in Table 4 are a valuable reference for researchers and meteorologists, providing information on when certain meteorological features deviate from their usual patterns. These deviations can be further analyzed to understand the underlying causes and consequences of climate or weather conditions during the periods in question.

#### 4.2.2. Result of Spearman's correlation

This study used Spearman's rank correlation technique to calculate the correlation values. This technique was applied because the characteristics of the data set used were not normally distributed. Unlike Pearson's correlation, Spearman's is a nonparametric measure that assesses monotonic relationships. Spearman correlation is valuable when dealing with data that do not meet linearity assumptions, such as ordinal data or data with outliers. By considering the order of data points rather than their actual values, this correlation technique provides a robust measure of association less sensitive to outliers and the shape of the relationship between variables, making it a versatile tool in various statistical analyses and research fields.

**Table 4.** Spearman correlation results between the features in the dataset.

Korelasyonlar												
		s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11
s1	rho	1,000										
	sig. (2-tailed)	.										
	n	1642										
s2	rho	-,014	1,000									
	sig. (2-tailed)	,584	.									
	n	1642	1642									
s3	rho	-,298**	,238**	1,000								
	sig. (2-tailed)	,000	,000	.								
	n	1642	1642	1642								
s4	rho	-,259**	,647**	,223**	1,000							
	sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	.							
	n	1642	1642	1642	1642							
s5	rho	,100**	,344**	-,023	,517**	1,000						
	sig. (2-tailed)	,000	,000	,358	,000	.						
	n	1642	1642	1642	1642	1642						
s6	rho	-,083**	,633**	,152**	,814**	,726**	1,000					
	sig. (2-tailed)	,001	,000	,000	,000	,000	.					
	n	1642	1642	1642	1642	1642	1642					
s7	rho	-,293**	,658**	,234**	,907**	,249**	,596**	1,000				
	sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.				
	n	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642				
s8	rho	-,176**	-,455**	-,102**	-,416**	-,364**	-,527**	-,346**	1,000			
	sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.			
	n	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642			
s9	rho	-,266**	,384**	,242**	,441**	,172**	,381**	,436**	-,309**	1,000		
	sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.		
	n	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642		
s10	rho	-,113**	,365**	,185**	,445**	,051*	,263**	,524**	-,182**	,319**	1,000	
	sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,040	,000	,000	,000	,000	.	
	n	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	
s11	rho	-,251**	,374**	,180**	,407**	,177**	,375**	,404**	-,288**	,881**	,288**	1,000
	sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	.
	n	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642	1642

\*. The correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)  
 \*\*. The Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

$i \in \text{features } \{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11\} \rightarrow Si$

Table 4 presents the results of the Spearman rank correlations between the variables (s1 to s11) based on the data set of 1,642 data points used in this study. The table, obtained with SPSS software, provides detailed information on the strength of the relationships between variables using nonparametric statistical measures. The table identifies correlations by significance values (Sig.) and rho values. In the table, the significance level is emphasized with asterisks; correlations marked with one asterisk (\*) are significant at the 0.05 level, while correlations marked with two asterisks (\*\*) are highly significant at the 0.01 level.

In the correlation table showing the outputs of the analyses, the acceptability, strength, and direction of the relationship between the variables are presented. The correlation coefficient (rho) can take values between -1 and +1. While -1 means that one of the variables increases while the other decreases, +1 means that the variables move in the same direction. If this coefficient is 0, it indicates no relationship between the variables [79]. However, the strength of the relationship is determined by the absolute value of the correlation coefficient [80]. According to the correlation coefficients, researchers consider the degree of relationship between two variables as 0.7 and above as strong and 0.9 and above as very strong. Other levels indicate moderate (rho>0.5) and weak relationships [81].

Table 4 shows significant strong and very strong correlations within the dataset. The table shows a significant relationship between 'total\_cloud' and 'min\_level\_cloud' with a strong positive correlation of 0.814. A strong correlation of 0.907 between 'total\_cloud' and 'low\_cloud' indicates a strong and positive relationship between these two parameters. In addition, a strong correlation of 0.726 between 'high\_level\_cloud' and 'mid\_level\_cloud.' Furthermore, the correlation coefficient 0.881 between 'wind\_speed' and 'turbo\_wind' indicates a strong relationship between these variables. In terms of moderate correlations, the table shows that there is a positive correlation between "rainfall" and "total\_cloud," "mid\_level\_cloud" and "low\_level\_cloud," a positive correlation between "total\_cloud" and "high\_level\_cloud," a positive correlation between "mid\_level\_cloud" and "low\_level\_cloud," a negative correlation with "pressure" and finally a positive moderate correlation between "low\_level\_cloud" and "wind\_direction."

## 5. Discussion and Conclusion

This study aims to perform AD tasks on time-indexed data obtained for meteorological events between January 1, 2019, and June 30, 2023, in Kazakhstan, the ninth-largest country in the world. AD tasks are performed using HTM, an unsupervised machine-learning model inspired by the human neocortex. The HTM model is one of the state-of-the-art approaches known for its effectiveness on TS problems. In addition, correlation analyses were performed to determine the strength and direction of monotonic relationships between meteorological features. In correlation analyses, the Spearman method was applied depending on the distribution characteristics of the data. Thus, the correlations between variables were considered for more precise and accurate AD.

According to the results obtained from the experimental studies, ten anomalies were detected in temperature, 4 in precipitation, 8 in snowfall, 1 in total cloud cover, 6 in high-level cloud cover, 9 in medium-level cloud cover, 5 in low-level cloud cover, and 1 in pressure. No anomalies were detected in wind speed. In the wind direction and turbo wind features, 4 and 9 high and medium anomalies were detected, respectively. The HTM model successfully detected 18 high-level and 39 mid-level anomalies. It was concluded that the HTM model detected a total of 57 different anomalies in the detection of anomalies in meteorological conditions. According to the results of Spearman correlation analysis between meteorological features, strong relationships were found between some variables. This shows that meteorological parameters are closely related to each other. The HTM model and correlation analysis results guide researchers in detecting abnormal conditions and effectively detecting high-level and low-level abnormal conditions. However, in the face of limitations such as the univariate rather than multivariate addressing of AD problems, this has been addressed with the help of correlation analyses. The results of the experimental studies show the HTM model's effectiveness, which can detect anomalies in various meteorological features. In this context, the findings show that the HTM model is an effective tool for detecting anomalies in meteorological data and has an effective potential in solving TS problems related to meteorological events.

Future studies are planned to use successful models such as HTM and LSTM to analyze early forecasts of meteorological events. These models have significant potential to process complex data to identify important trends and detect potential anomalies. This will provide a stronger and more effective basis for a better understanding of meteorological events and forecasting future weather events.

## References

- [1] Friston K and Buzsáki G, “The functional anatomy of time: what and when in the brain,” *Trends in cognitive sciences*, vol. 20, no. 7, pp. 500–511, 2016.
- [2] Choi K, Yi J., Park C., and Yoon S., “Deep learning for anomaly detection in time-series data: review, analysis, and guidelines,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 120043–120065, 2021.
- [3] Långkvist M., Karlsson L., and Loutfi A., “A review of unsupervised feature learning and deep learning for time-series modeling,” *Pattern Recognition Letters*, vol. 42, no. 1, pp. 11–24, 2014, doi: 10.1016/j.patrec.2014.01.008.
- [4] Idrees SM, Alam SM, and Agarwal P., “A prediction approach for stock market volatility based on time series data,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 17287–17298, 2019.
- [5] Box G., “Box and Jenkins: Time Series Analysis, Forecasting and Control,” in *A Very British Affair: Six Britons and the Development of Time Series Analysis During the 20th Century*, Springer, 2013, pp. 161–215.
- [6] Fu TC, “A review on time series data mining,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24, no. 1, pp. 164–181, 2011, doi: 10.1016/j.engappai.2010.09.007.
- [7] Donatelli RE, Park JA, Mathews SM, and Lee JS, “Time series analysis,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 161, no. 4. Elsevier, pp. 605–608, 2022.
- [8] Dietterich TG, “Machine learning for sequential data: A review,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2002, vol. 2396, pp. 15–30, doi: 10.1007/3-540-70659-3\_2.
- [9] Agrawal R., Faloutsos C., and Swami A., “Efficient similarity search in sequence databases,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1993, vol. 730 LNCS, pp. 69–84, doi: 10.1007/3-540-57301-1\_5.
- [10] Abonyi J., Feil B., Nemeth S., and Arva P., “Modified Gath-Geva clustering for fuzzy segmentation of multivariate time-series,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 149, no. 1, pp. 39–56, 2005, doi: 10.1016/j.fss.2004.07.008.
- [11] Keogh E. and Ratanamahatana CA, “Exact indexing of dynamic time warping,” *Knowledge and information systems*, vol. 7, pp. 358–386, 2005.
- [12] Keogh E. and Pazzani M., “An enhanced representation of time series which allows fast and accurate classification, clustering and relevance feedback,” in *Kdd*, 1998, vol. 98, pp. 239–243, [Online]. Available: <http://www.aaai.org/Papers/KDD/1998/KDD98-041.pdf>.
- [13] Liu G., Zhong K., Li H., Chen T., and Wang Y., “A state of art review on time series forecasting with machine learning for environmental parameters in agricultural greenhouses,” *Information Processing in Agriculture*, 2022.
- [14] UA. Bhatti *et al.*, “Time series analysis and forecasting of air pollution particulate matter (PM 2.5): an SARIMA and factor analysis approach,” *Ieee Access*, vol. 9, pp. 41019–41031, 2021.
- [15] Saka F., Karaoğlan KM, “Detecting Anomalies in Dam Water Levels using Hierarchical Temporal Memory: A Case Study in Istanbul Province,” in *4th International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences 2023 (IEACES2023)*, 2023, pp. 139–150.
- [16] Thoppil NM., Vasu V., and Rao CSP., “Deep Learning Algorithms for Machinery Health Prognostics Using Time-Series Data: A Review,” *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, vol. 9, no. 6, pp. 1123–1145, 2021, doi: 10.1007/s42417-021-00286-x.
- [17] Abanda A., Mori U., and Lozano JA., “A review on distance based time series classification,” *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 33, no. 2, pp. 378–412, 2019, doi: 10.1007/s10618-018-0596-4.
- [18] Li H. and Du T., “Multivariate time-series clustering based on component relationship networks,” *Expert Systems with Applications*, vol. 173, p. 114649, 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.114649.
- [19] Wu J., Zeng W., and Yan F., “Hierarchical Temporal Memory method for time-series-based anomaly detection,” *Neurocomputing*, vol. 273, pp. 535–546, 2018, doi: 10.1016/j.neucom.2017.08.026.
- [20] Li G. and Jung JJ., “Deep learning for anomaly detection in multivariate time series: Approaches, applications, and challenges,” *Information Fusion*, vol. 91, pp. 93–102, 2023, doi: 10.1016/j.inffus.2022.10.008.
- [21] Ahmed M., Mahmood AN., and Islam MR., “A survey of anomaly detection techniques in financial domain,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 55, pp. 278–288, 2016.
- [22] Shaukat K. *et al.*, “A Review of Time-Series Anomaly Detection Techniques: A Step to Future Perspectives,” in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1363 AISC, pp. 865–877, doi: 10.1007/978-3-030-73100-7\_60.

- [23] Lin J., Keogh E., Fu A., and Van HH., “Approximations to magic: Finding unusual medical time series,” in *Proceedings - IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, 2005, pp. 329–334, doi: 10.1109/cbms.2005.34.
- [24] Shyu ML., Chen SC., Sarinnapakorn K., and Chang L., “A novel anomaly detection scheme based on principal component classifier,” in *Proceedings of the IEEE foundations and new directions of data mining workshop*, 2003, pp. 172–179.
- [25] Angiulli F. and Pizzuti C., “Fast outlier detection in high dimensional spaces,” in *European conference on principles of data mining and knowledge discovery*, 2002, pp. 15–27.
- [26] Hosseinzadeh M., Rahmani AM., Vo B., Bidaki M., Masdari M., and Zangakani M., “Improving security using SVM-based anomaly detection: issues and challenges,” *Soft Computing*, vol. 25, no. 4, pp. 3195–3223, 2021, doi: 10.1007/s00500-020-05373-x.
- [27] Hu M., Feng X., Ji Z., Yan K., and Zhou S., “A novel computational approach for discord search with local recurrence rates in multivariate time series,” *Information Sciences*, vol. 477, pp. 220–233, 2019.
- [28] Chandola V., Banerjee A., and Kumar V., “Anomaly detection: A survey,” *ACM computing surveys (CSUR)*, vol. 41, no. 3, pp. 1–58, 2009.
- [29] Lavin A. and Ahmad S., “Evaluating real-time anomaly detection algorithms—the Numenta anomaly benchmark,” in *2015 IEEE 14th international conference on machine learning and applications (ICMLA)*, 2015, pp. 38–44.
- [30] Sgueglia A., Di Sorbo A., Visaggio CA., and Canfora G., “A systematic literature review of IoT time series anomaly detection solutions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 134, pp. 170–186, 2022.
- [31] Terrades OR., Berenguel A., and Gil D., “A flexible outlier detector based on a topology given by graph communities,” *Big Data Research*, vol. 29, p. 100332, 2022.
- [32] Li C., Mo L., Tang H., and Yan R., “Lifelong condition monitoring based on NB-IoT for anomaly detection of machinery equipment,” *Procedia Manufacturing*, vol. 49, pp. 144–149, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.07.010.
- [33] Kim TY. and Cho SB., “Web traffic anomaly detection using C-LSTM neural networks,” *Expert Systems with Applications*, vol. 106, pp. 66–76, 2018.
- [34] He Q., Zheng YJ., Zhang CL., and Wang HY., “MTAD-TF: Multivariate time series anomaly detection using the combination of temporal pattern and feature pattern,” *Complexity*, vol. 2020, pp. 1–9, 2020.
- [35] Audibert J., Michiardi P., Guyard F., Marti S., and Zuluaga MA., “Do deep neural networks contribute to multivariate time series anomaly detection?,” *Pattern Recognition*, vol. 132, p. 108945, 2022.
- [36] Lindemann B., Maschler B., Sahlab N., and Weyrich M., “A survey on anomaly detection for technical systems using LSTM networks,” *Computers in Industry*, vol. 131, p. 103498, 2021.
- [37] Ahmed M., Naser MA., and Hu J., “A survey of network anomaly detection techniques,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 60, pp. 19–31, 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2015.11.016.
- [38] Fernando T., Gammulle H., Denman S., Sridharan S., and Fookes C., “Deep learning for medical anomaly detection—a survey,” *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 54, no. 7, pp. 1–37, 2021.
- [39] Kwon D., Kim H., Kim J., Suh SC., Kim I., and Kim KJ., “A survey of deep learning-based network anomaly detection,” *Cluster Computing*, vol. 22, pp. 949–961, 2019.
- [40] Aldweesh A., Derhab A., and Emam AZ., “Deep learning approaches for anomaly-based intrusion detection systems: A survey, taxonomy, and open issues,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 189, p. 105124, 2020.
- [41] Rashid ANMB., Ahmed M., Sikos LF., and Haskell-Dowland P., “Anomaly detection in cybersecurity datasets via cooperative co-evolution-based feature selection,” *ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS)*, vol. 13, no. 3, pp. 1–39, 2022.
- [42] Hodge V. and Austin J., “A survey of outlier detection methodologies,” *Artificial intelligence review*, vol. 22, pp. 85–126, 2004.
- [43] Chen Y., Sui Y., and Shayilan A., “Constructing a high-performance self-training model based on support vector classifiers to detect gold mineralization-related geochemical anomalies for gold exploration targeting,” *Ore Geology Reviews*, p. 105265, 2022.
- [44] Nassif AB., Talib MA., Nasir Q., and Dakalbab FM., “Machine learning for anomaly detection: A systematic review,” *Ieee Access*, vol. 9, pp. 78658–78700, 2021.
- [45] Schmidl S., Wenig P., and Papenbrock T., “Anomaly Detection in Time Series: A Comprehensive Evaluation,” *Proceedings of the VLDB Endowment*, vol. 15, no. 9, pp. 1779–1797, 2022, doi: 10.14778/3538598.3538602.
- [46] Dong B. and Wang X., “Comparison deep learning method to traditional methods using for network intrusion detection,” in *2016 8th IEEE international conference on communication software and networks*

- (*ICCSN*), 2016, pp. 581–585.
- [47] Kim K. and Aminanto ME., “Deep learning in intrusion detection perspective: Overview and further challenges,” in *2017 International Workshop on Big Data and Information Security (IWBIS)*, 2017, pp. 5–10.
- [48] Karatas G., Demir O., and Sahingoz OK., “Deep learning in intrusion detection systems,” in *2018 International Congress on Big Data, Deep Learning and Fighting Cyber Terrorism (IBIGDELFT)*, 2018, pp. 113–116.
- [49] Li J., Izakian H., Pedrycz W., and Jamal I., “Clustering-based anomaly detection in multivariate time series data,” *Applied Soft Computing*, vol. 100, p. 106919, 2021.
- [50] Ahmad S., Lavin A., Purdy S., and Agha Z., “Unsupervised real-time anomaly detection for streaming data,” *Neurocomputing*, vol. 262, pp. 134–147, 2017.
- [51] Ma T., Zhu Z., Wang L., Wang H., and Ma L., “Anomaly detection for hydropower turbine based on variational modal decomposition and hierarchical temporal memory,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1546–1551, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.02.286.
- [52] Soares E., Costa Jr P., Costa B., and Leite D., “Ensemble of evolving data clouds and fuzzy models for weather time series prediction,” *Applied Soft Computing*, vol. 64, pp. 445–453, 2018.
- [53] Bamaqa A., Sedky M., Bosakowski T., and Bastaki BB., “Anomaly Detection Using Hierarchical Temporal Memory (HTM) in Crowd Management,” in *Proceedings of the 2020 4th International Conference on Cloud and Big Data Computing*, 2020, pp. 37–42, doi: 10.1145/3416921.3416940.
- [54] “Sample Weather Dataset in Kazakhstan | Kaggle.” <https://www.kaggle.com/datasets/armanzhargasbayev/sample-weather-dataset> (accessed Sep. 12, 2023).
- [55] Cui Y., Surpur C., Ahmad S., and Hawkins J., “A comparative study of HTM and other neural network models for online sequence learning with streaming data,” in *2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2016, pp. 1530–1538.
- [56] Hawkins J. and Ahmad S., “Why neurons have thousands of synapses, a theory of sequence memory in neocortex,” *Frontiers in neural circuits*, vol. 10, p. 23, 2016, doi: 10.3389/fncir.2016.00023.
- [57] Hawkins J., Ahmad S., and Dubinsky D., “Hierarchical temporal memory including HTM cortical learning algorithms,” *Technical report, Numenta, Inc, Palto Alto* [http://www.numenta.com/htmoveryview/education/HTM\\_CorticalLearningAlgorithms.pdf](http://www.numenta.com/htmoveryview/education/HTM_CorticalLearningAlgorithms.pdf), 2010.
- [58] Wielgosz M. and Pietroń M., “Using Spatial Pooler of Hierarchical Temporal Memory to classify noisy videos with predefined complexity,” *Neurocomputing*, vol. 240, pp. 84–97, 2017, doi: 10.1016/j.neucom.2017.02.046.
- [59] Ahmad S. and Hawkins J., “Properties of Sparse Distributed Representations and their Application to Hierarchical Temporal Memory,” *arXiv preprint arXiv:1503.07469*, 2015, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1503.07469>.
- [60] Struye J. and Latré S., “Hierarchical temporal memory and recurrent neural networks for time series prediction: An empirical validation and reduction to multilayer perceptrons,” *Neurocomputing*, vol. 396, pp. 291–301, 2020, doi: 10.1016/j.neucom.2018.09.098.
- [61] Barua A., Muthirayan D., Khargonekar PP., and Al Faruque MA., “Hierarchical Temporal Memory-Based One-Pass Learning for Real-Time Anomaly Detection and Simultaneous Data Prediction in Smart Grids,” *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 19, no. 3, pp. 1770–1782, 2020.
- [62] Akila D., Pal S., Jayakarthish R., Chattopadhyay S., and Obaid AJ., “Deep Learning Enhancing Performance Using Support Vector Machine HTM Cortical Learning Algorithm,” in *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1963, no. 1, p. 12144, doi: 10.1088/1742-6596/1963/1/012144.
- [63] Attneave F., MB., and Hebb DO., *The Organization of Behavior; A Neuropsychological Theory*, vol. 63, no. 4. Psychology press, 1950.
- [64] Hawkins J., “(BAMI) Biological and Machine Intelligence,” *Numenta*, p. 64, 2019.
- [65] Purdy S., “Encoding data for HTM systems,” *arXiv preprint arXiv:1602.05925*, 2016.
- [66] Cui Y., Ahmad S., and Hawkins J., “The HTM spatial pooler—a neocortical algorithm for online sparse distributed coding,” *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 11, p. 111, 2017, doi: 10.3389/fncom.2017.00111.
- [67] Lai YK. and Nguyen MH., “A Real-Time DDoS Attack Detection and Classification System Using Hierarchical Temporal Memory,” *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, vol. 12, no. 2, 2023.
- [68] Ziyarah AM and Kudithipudi D., “Neuromorphic Architecture for the Hierarchical Temporal Memory,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, vol. 3, no. 1, pp. 4–14, 2019, doi: 10.1109/TETCI.2018.2850314.

- [69] Taylor R., “Interpretation of the Correlation Coefficient: A Basic Review,” *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, vol. 6, no. 1, pp. 35–39, 1990, doi: 10.1177/875647939000600106.
- [70] Warren WG., “Correlation or Regression: Bias or Precision,” *Applied Statistics*, vol. 20, no. 2, p. 148, 1971, doi: 10.2307/2346463.
- [71] Asuero AG., Sayago A., and González AG., “The correlation coefficient: An overview,” *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, vol. 36, no. 1, pp. 41–59, 2006, doi: 10.1080/10408340500526766.
- [72] Ratner B., “The correlation coefficient: Its values range between+ 1/- 1, or do they?,” *Journal of targeting, measurement and analysis for marketing*, vol. 17, no. 2, pp. 139–142, 2009.
- [73] Spearman C., “The Proof and Measurement of Association between Two Things,” *The American Journal of Psychology*, vol. 15, no. 1, p. 72, 1904, doi: 10.2307/1412159.
- [74] Lehman A. and Rourke NO., “JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics A Step-by-Step Guide,” *Analysis*, p. 146, 2005, Accessed: Sep. 18, 2023. [Online]. Available: <http://books.google.com/books?id=1nlApuloc0AC&pgis=1>.
- [75] Eden SK., Li C., and Shepherd BE., “Nonparametric estimation of Spearman’s rank correlation with bivariate survival data,” *Biometrics*, vol. 78, no. 2, pp. 421–434, 2022, doi: 10.1111/biom.13453.
- [76] Agostino RBD., “Tests for the Normal Distribution,” in *Goodness-of-Fit Techniques*, Routledge, 2018, pp. 367–420.
- [77] Mohd RN. and Bee WY., “Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests,” *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, vol. 2, no. 1, pp. 13–14, 2011.
- [78] Yap BW. and Sim CH., “Comparisons of various types of normality tests,” *Journal of Statistical Computation and Simulation*, vol. 81, no. 12, pp. 2141–2155, 2011, doi: 10.1080/00949655.2010.520163.
- [79] Kavak B., “Pazarlama araştırmaları tasarımı ve analiz.,” *Ankara. Detay Yayıncılık*, 2013.
- [80] Gegez AE., *Pazarlama araştırmacıları*. Beta Basım Yayım Dağıtım AŞ., 2007.
- [81] Nakip M., *Pazarlama Araştırmaları Teknikler ve Uygulamalar*. Seçkin Yayıncılık, 2006.

## Cilt Kanseri Görüntüleri Kullanılarak Eğitilen EfficientNet-B3 Mimarisinde Hiperparametre Seçiminin Sınıflandırma Performansına Etkisinin İncelenmesi

Ahmet Bahadır KARLI<sup>1\*</sup>, Buket KAYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Stratejik Bilgi Yönetim Sistemleri, Tıp Fakültesi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

<sup>2</sup> Elektronik ve Otomasyon Bölümü, EOSB Meslek Yüksek Okulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> abkarli@gmail.com, <sup>2</sup> bkaya@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 26/01/2024;

Kabul/Accepted: 27/03/2024)

**Öz:** Bu çalışmada cilt kanserini tespit etmek için derin öğrenme tekniklerini kullanan EfficientNetB3 gibi mimarilerin performanslarını görmek için cilt lezyonlarını içeren HAM10000 veri seti ile çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada derin öğrenmede, öğrenme oranının görüntü sınıflandırmada kullanılan evrişimli sinir ağlarını kullanan mimariler üzerindeki etkisini görmek için uygulamalar yapılmıştır. Bu uygulamalar öğrenme oranının, veri setinin büyüklüğü ve çeşitliliği ve eğitimde kullanılan görüntü sayıları ile birlikte artırılmış görüntü sayılarının hem sınıflandırmadaki başarıya hem de eğitim için geçen süreye etkisini görmek amacıyla yapılmıştır. Mimari olarak EfficientNetB3 ve veri seti olarak ta Kaggle platformunda açık erişimi olan HAM10000 veri seti kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, mümkün olduğu kadar artırılmış görüntü kullanmadan ve her bir hastalık sınıfına ait 600 görüntü olacak şekilde, 0,002 öğrenme oranı ve 10 yerine epoch 15 alınarak beşinci uygulamada en yüksek 0.8234 doğruluk performansı elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler** Evrişimli sinir ağı, öğrenme oranı, derin öğrenme, HAM10000, cilt kanseri

### Investigation of the Effect of Hyperparameter Selection on Classification Performance in EfficientNet-B3 Architecture Trained Using Skin Cancer Images

**Abstract:** In this study, a study was conducted with the HAM10000 dataset containing skin lesions to see the performance of architectures such as EfficientNetB3, which uses deep learning techniques to detect skin cancer. In this study, applications were made in deep learning to see the effect of the learning rate or learning rate on architectures using convolutional neural networks used in image classification. These applications were made to see the effect of the learning rate, the size and diversity of the data set, and the number of images used in training, as well as the increased number of images, on both the success in classification and the time taken for training. EfficientNetB3 was used as the architecture and HAM1000 dataset, which is open access on the Kaggle platform, was used as the dataset. At the end of the study, without using as many augmented images as possible and with 600 images of each disease class, a learning rate of 0.002 and epoch 15 instead of 10, the highest accuracy performance of 0.8234 was achieved in the fifth application.

**Key words:** Convolutional neural network (CNN), learning rate, deep learning, HAM10000, skin cancer

#### 1. Giriş

Genellikle melanom ve nonmelanom olarak iki kategoriye ayrılan ve vücudun diğer bölgelerine yayılım eğilimi gösteren cilt kanseri tehlikeli kanser türlerinden biridir. Cilt kanserinin teşhisi için şüpheli bir cilt lezyonundan alınması suretiyle genellikle biyopsi yönetimi kullanılır. Bu yöntem yavaş ve zaman alıcıdır [1]. Melanom türü cilt kanseri, erken teşhis edildiğinde tedavi edilebilir bir kanser türüdür. Bundan dolayı cilt kanserini erken tespit etmek için yeni teknikler geliştirilmektedir [2]. Melanom nadir görülen bir kanser türü olsa da ölüm oranı yüksek bir kanser türüdür [3]. Melanom türü kanserlerde erken teşhis kritik bir faktördür. Erken teşhis edilmediğinde, vücudun diğer bölgelerine yayılarak hastanın ölümüne yol açar [4]. Erken teşhisin önemli olduğu Melanom türü cilt kanserinin tespitinde cilt lezyonlarını sınıflandırmak için derin öğrenme teknikleri kullanılarak çok hızlı teşhis konulabilir. Derin öğrenme teknikleri kullanılarak cilt lezyonlarını sınıflandırmak için, genel olarak görüntünün bölümlere ayrılması, özelliklerin çıkarılması ve sınıflandırılması aşamaları gerçekleştirilir. Görüntü sınıflandırmada kullanılan derin öğrenme tekniklerinden biri Evrişimli Sinir Ağlarıdır.

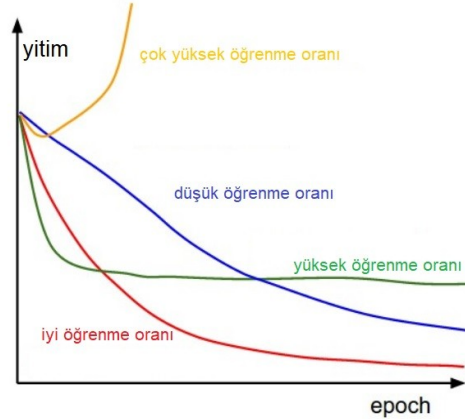
Derin öğrenme (çok katmanlı yapay sinir ağı), katmanlı mimarisiyle büyük veri setlerinden öğrenme gerçekleştiren makine öğreniminin bir alt dalıdır. Derin öğrenmede hatayı minimuma düşürmek için kullanılan gradyan iniş tabanlı optimizasyon algoritmaları (Stochastic gradient descent, momentum, adam, adagrad, rmsprop ve adadelta) bu başarının bir parçası olmaktadır [5]. Derin öğrenme, son yıllarda hem denetimli hem de denimsiz öğrenme zorluklarında yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. Evrişimli Sinir Ağları, görüntü sınıflamada iyi

\* Sorumlu yazar: [abkarli@gmail.com](mailto:abkarli@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0005-5997-2546, <sup>2</sup> 0000-0001-9505-181X

performans gösteren modellerden biridir. Evrişimli Sinir Ağları, tıbbi görüntülerin analizi, görüntü tanıma ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

Derin ağ modelleri tasarlanırken, katman sayısı, nöron sayısı, öğrenme oranı gibi ne olması gerektiği modeli tasarlayan kişiye bırakılmış, probleme, veri setine göre değişiklik gösteren parametreler hiper parametre (hyperparameters) olarak adlandırılmaktadır [8]. Sinir ağlarını ayarlamak için öğrenme oranı, kayıp gradyan düşüşüne göre ağırlıklarındaki ayarlamayı tanımlayan, ağırmızdaki ağırlıkları güncelleyen, optimum ağırlıklara doğru ne kadar hızlı veya yavaş ilerleyeceğimizi belirleyen böyle önemli bir hiperparametredir [9]. Başka bir deyişle bir hiper parametre, en doğru tahminleri elde etmek amacıyla uygulayıcı tarafından uygulanan modelin dışında bir yapılandırma değişkenidir [10]. Hiper parametreler, model parametrelerini tahmin etme sürecinin önemli bir parçasıdır ve genellikle uygulayıcı tarafından tanımlanır.

Derin öğrenme sinir ağları, stokastik gradyan iniş optimizasyonu algoritması kullanılarak eğitilir [11]. Evrişimli sinir ağları ileri beslemeli ve geri yayımlı olarak çalışan sinir ağlarıdır. Stokastik gradyan iniş, modelin mevcut durumu için hata gradyanını tahmin eden ve ardından geri yayılım olarak adlandırılan hataların geri yayılımı algoritmasını kullanarak modelin ağırlıklarını güncelleyen bir optimizasyon algoritmasıdır [12]. Bilinen en popüler optimizasyon algoritması uyarlamalı öğrenme oranı yöntemini kullanan Adam algoritmasıdır. Eğitim sırasında, hatanın geri yayılımı, ağırdaki bir düğümün ağırlıklarının sorumlu olduğu hata miktarını tahmin eder ve ağırlığı öğrenme oranına göre ölçeklendirerek güncelleme yapar. Bu durumda öğrenme oranı parametresinin, eğitimde kullanılacak veri seti boyutu da dikkate alarak nasıl belirleneceği önerilen çalışma ile ele alınmıştır. Eğitimdeki istikrarsızlığı veya eğitimdeki performans dalgalanmalarını önlemek için başlangıçtaki öğrenme oranını büyük mü yoksa küçük mü seçmek gerektiği üzerine araştırma yürütülmüştür. Büyük seçildiğinde eğitim süresi önemli ölçüde kısalmış ama kullanılan modelin performansının dalgalanmasına sebep olur. Çok küçük seçilirse eğitim süresi önemli ölçüde uzayabilir hatta yetersiz bir çözümde takılıp kalabilir. Dolayısıyla öğrenme oranı parametresi modelin performansını belirleyen, sinir ağlarını ayarlamak için kullanılan en önemli parametrelerden biri olduğundan dolayı hem eğitim süresini kısaltacak hem de yüksek doğrulukla sınıflama yapacak şekilde orantılı bir öğrenme oranı belirlemek gerekiyor. Şekil 1'de öğrenme oranı seçiminin eğitimdeki kayıp üzerine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 1. Öğrenme oranı seçiminin eğitimdeki kayıp üzerindeki etkisi [13]

Cilt kanserindeki lezyonları sınıflandırmak için Evrişimsel Sinir Ağları kullanılabilir. Amit Sanjay Shete ve arkadaşları [6] cilt kanserlerini tespit etmek için Evrişimsel sinir ağlarını ve dermastokopik görüntülerden oluşan HAM10000 veri setini kullanmışlardır. Veri setindeki görüntü kirliliğinin giderildiği ve transfer öğrenme yaklaşımının ve ImageNet ağırlıklarının kullanıldığı çalışmada 0.77 F1-skoru elde edilmiştir. Karar Ali ve arkadaşları [14], Önceden eğitilmiş ImageNet ağırlıkları üzerinde transfer öğrenimi gerçekleştirerek ve Evrişimsel Sinir Ağlarında ince ayar yaparak, EfficientNets B0-B7 mimarilerini HAM10000 veri seti üzerinde eğittiler. Bu mimariler içinde %87,91 ile en yüksek doğruluk oranını EfficientNet B4 mimarisi vermiştir. Oktay Yıldız tarafından yapılan çalışmada cilt kanseri melanomu tespit etmek için Evrişimsel Sinir Ağlarını kullanan C4Net mimarisi önerilmiştir. Sunulan çalışmada önerilen mimari, derin öğrenme algoritmalarını kullanan AlexNet, GoogLeNet, ResNet, VGGNet gibi mimariler ile birlikte yapay sinir ağları, k-En yakın komşu algoritması ve Destek vektör makinesi gibi geleneksel makine öğrenme algoritmalarıyla da karşılaştırılmıştır. Veri seti olarak ISIC tarafından derlenen 3920 dermoskopi görüntünün kullanıldığı çalışmada önerilen C4Net mimarisi ile %96,94 ile diğer yöntemlere göre daha fazla sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir [15]. Erhan Ergün ve arkadaşları tarafından melanom tespiti için HAM10000 veri seti kullanılarak yapılan çalışmada derin öğrenme mimarileri

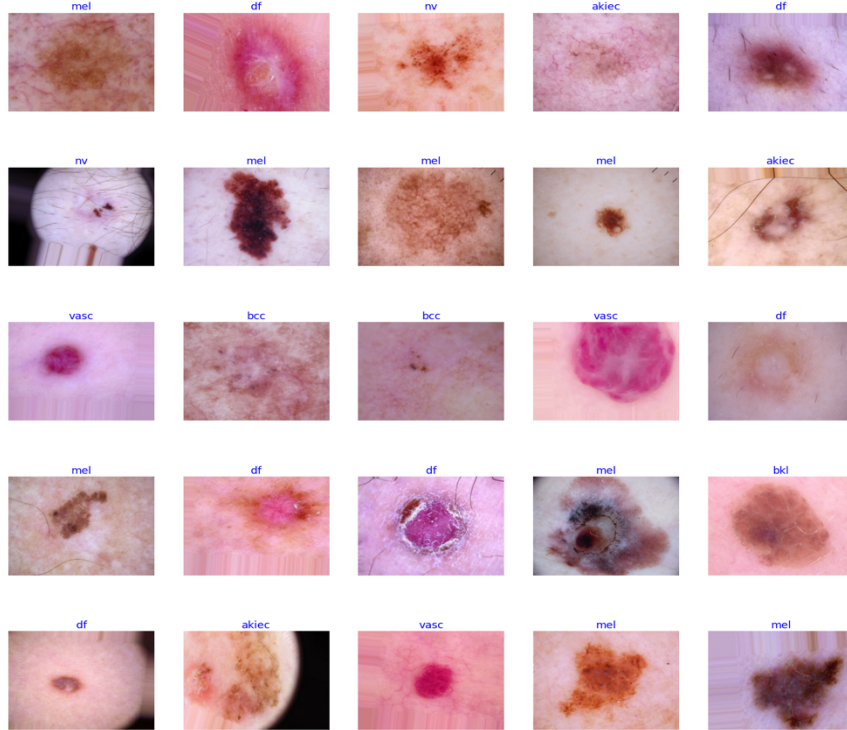


karşılaştırılmıştır. Cilt lezyonlarını sınıflandırmak için popüler olan AlexNet, DenseNet-121, ResNet-18, ResNet-34, SqueezeNet ve VGGNet-16 mimarilerinin kullanıldığı çalışmada ResNet-34 mimarisi, %84,5 F-skoru ile diğer mimarileri geride bırakmıştır [16]. Tri Cong Pham ve arkadaşları melanom tespiti için HAM10000 veri setini kullanmışlardır. Çalışmada melanomun renk, doku ve şekil özellikleri hakkında karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada HSV (Ton-Doygunluk-Değer), LBP (Yerel İkili Model) gibi 7 özellik çıkarma yöntemi ile birlikte veri ön işleme adımı olarak Gauss Bulanıklığı, Normalleştirme ve Gauss Bulanıklığı ile Normalleştirmenin birleşimi yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Sınıflandırıcı olarak SVM (Destek Vektör Makinesi), LR (Lojistik Regresyon), RF (Rastgele Orman), BRF (Dengeli Rastgele Orman) gibi algoritmaların kullanıldığı çalışmada özellik çıkarma yöntemi olarak HSV ve sınıflandırıcı olarak Dengeli Rastgele Ormandan oluşan yöntemde %74,75 doğruluk değeri elde edilmiştir [17].

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Veri Seti ve Uygulama Detayları

Bu çalışmada Pigmente lezyonları (renkli yara) için tüm önemli teşhis kategori vakalarını temsil eden (vasc, bkl, akiec, bcc, df, mel, nv) 10015 dermatoskopik görüntülerden oluşan HAM10000 veri seti kullanılmıştır. EfficientNetB3 mimarisi kullanılarak oluşturulan modelde derin öğrenme ağı eğitilmiş, eğitim ve test verilerine ilişkin sonuçlar farklı öğrenme oranları kullanılarak elde edilmiştir. Çalışmanın amacı derin mimaride kullanılan hiper parametrelerden öğrenme oranının mimari üzerindeki sınıflandırma başarısı ve eğitim için geçen süreye etkisini görmektir. Bununla birlikte eğitimde kullanılacak olan veri setinin çeşitliliği ve görüntü sayılarının ve artırılmış görüntülerin de modelin üzerindeki etkisini görmek amacıyla çalışmada farklı sayılarda eğitim veri seti oluşturularak çalışma yapılmıştır. Çalışmada kullanılan 10015 görüntüden oluşan veri setindeki her bir hastalık sınıfına ait görüntüler aynı sayıda değildir. Derin Öğrenme mimarisinin eğitim sürecinde kullanılacak olan her bir hastalık sınıfına ait görüntü sayılarında mümkün olduğu kadar homojen dağılımını sağlamak amacıyla, görüntüler, artırılmış görüntü ile görüntü sayıları eşitlenerek kullanılmıştır. Bundan dolayı başlangıçta eğitim aşamasında her sınıftan 300 görüntü olacak şekilde homojen bir dağılım sağlanmaya çalışılmıştır. Şekil 2’de HAM10000 veri setine ait örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 2. HAM10000 Veri Seti Örnek Görüntüleri

## 2.2. Metot

Bu çalışmada EfficientNetB3 mimarisi ve HAM1000 veri seti kullanılarak uygulamalar yapılmıştır. Veri setinde cilt kanserleri teşhis vakalarını temsil eden 7 sınıfa ait 10015 JPEG formatında görüntü mevcuttur. Veri setindeki görüntüler ortalama 450X600 piksel boyutunda ve 7 hastalık sınıfını temsil eden görüntülerden oluşmaktadır. Hastalık sınıflarının dağılımı aşağıdaki Tablo 1’de gösterilmiştir.

**Tablo 1 . HAM10000 veri seti hastalık sınıflarının dağılımı**

Sınıf No	Adı	Veri Seti frekansı
1	akiec	327
2	bcc	514
3	bkl	1099
4	df	115
5	mel	1113
6	nv	6705
7	vasc	142

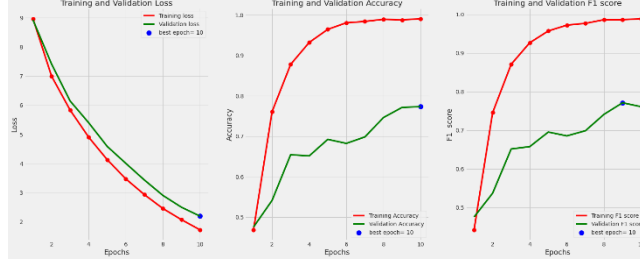
Tablo 1’de görüldüğü gibi veri setindeki hastalık sınıflarına ait görüntü sayıları eşit değildir. Çalışma, Kaggle platformunda GPU T4 X 2 grafik kartı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir. Veri seti 0,8 oranında eğitime, 0,1 oranında doğrulama ve 0.1 oranında test için ayrılmıştır.

Çalışmada kullanılan HAM10000 veri setindeki her hastalık sınıfına ait görüntüler Tablo 1’de görüldüğü gibi birbirine yakın sayıda değildir. Örneğin nv hastalık sınıfına ait görüntü sayısı 6705 iken vasc hastalık sınıfına ait görüntü sayısı 142 adettir. Dengeli olmayan bu veri setindeki görüntüler, eğitim amaçlı rastgele seçilirken görüntü sayısı çok olan bir hastalık sınıfına ait görüntülerin belirleyici olmaması için homojen bir dağılım sağlanması gerekiyordu. Bu durum göz önünde bulundurularak ilk çalışmada eğitim için rastgele seçilen görüntü sayılarında homojen bir dağılım sağlanması amacıyla her bir sınıftan en fazla 200 en az 92 görüntü olacak şekilde veri seti bölünmüştür. İlk çalışmada toplamda her bir sınıftan 300 görüntü olacak şekilde artırılmış görüntülerle denge sağlanmıştır. Eğitim için her sınıftan 300, toplamda 2100 görüntü kullanılmıştır. Momentumu (kontrollü inme) değiştirmeden ilk değer olarak ImageNet ağırlıkları kullanılarak ***öğrenme oranı 0,001***, epoch 10 ve eğitim için batch size 30 olarak alınmıştır. Tablo 2’de ilk uygulamada eğitim için seçilen görüntülerin sayısı verilmiştir.

**Tablo 2 . Birinci uygulama, eğitim için seçilen görüntülerin sayısı**

n=300 # number of samples in each class for train dataframe	
Initial length of train dataframe is 1206	
Found 200 validated image filenames. for class nv	creating 100 augmented images
Found 200 validated image filenames. for class bkl	creating 100 augmented images
Found 200 validated image filenames. for class mel	creating 100 augmented images
Found 200 validated image filenames. for class bcc	creating 100 augmented images
Found 200 validated image filenames. for class akiec	creating 100 augmented images
Found 92 validated image filenames. for class df	creating 208 augmented images
Found 114 validated image filenames. for class vasc	creating 186 augmented images
Total Augmented images created= 894 Length of augmented dataframe is now 2100	
Found 2100 validated image filenames belonging to 7 classes. for train generator Found 1001 validated image filenames belonging to 7 classes. for valid generator Found 1002 validated image filenames belonging to 7 classes. for test generator	

Bu parametreler ile model eğitilmiştir. Eğitim süresi 0 saat 11 dakika 58,36 saniye sürmüştür ve model 0,7585 doğruluk performansı göstermiştir. Uygulamada elde edilen eğitimdeki kayıplar ve doğrulama doğruluğuna ilişkin ölçüm grafikleri ve yapılan tahminlere ilişkin test sonuçlarını gösteren karmaşıklık matrisi Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Eğitim ve test sonuçlarına ilişkin değerlendirmeler tartışma kısmında yapılmıştır.

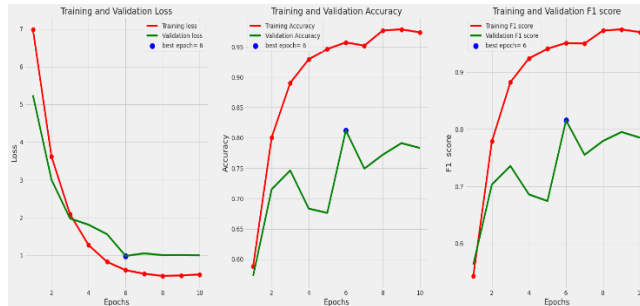


Şekil 3. Birinci uygulama kapsamındaki eğitim kaybı ve doğrulama doğruluğu grafikleri

		Confusion Matrix						
		akiec	bcc	bkl	df	mel	nv	vasc
Actual	akiec	26	3	0	2	1	0	0
	bcc	8	37	0	1	1	4	1
	bkl	19	10	64	1	8	8	0
	df	1	0	0	10	0	0	0
	mel	11	2	13	2	61	22	1
	nv	12	13	31	4	55	548	8
	vasc	0	0	0	0	0	0	14
			akiec	bcc	bkl	df	mel	nv
		Predicted						

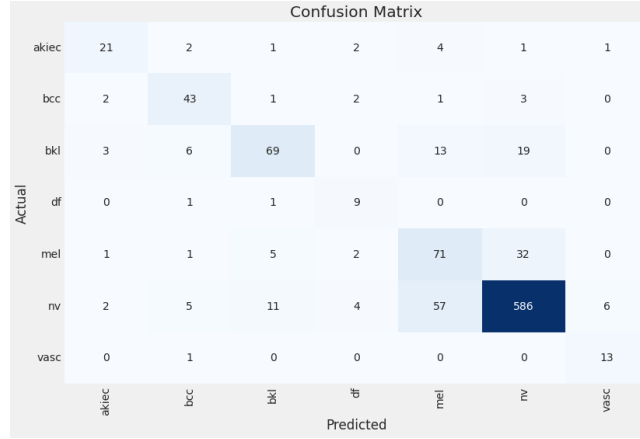
Şekil 4. Birinci uygulama kapsamındaki karmaşıklık matrisi

İkinci uygulamada model üzerindeki etkilerini görmek için öğrenme oranını ve eğitimde kullanılan görüntü sayıları artırılarak uygulama yapılmıştır. Bu aşamada eğitim için her hastalık sınıfından 700 görüntü olacak şekilde kullanılan görüntü sayısı toplam 4.900 olarak belirlendi. Momentumu değiştirmeden ilk değer olarak ImageNet ağırlıkları kullanılarak ***öğrenme oranı 0,002***, epoch 10 ve eğitim için batch değeri 30 seçilmiştir. Eğitim süresi 0 saat 23 dakika 51,68 saniye sürmüştür ve model 0,8104 doğruluk performansı göstermiştir. Uygulamada elde edilen eğitimdeki kayıplar ve doğrulama doğruluğuna ilişkin ölçüm grafikleri ve yapılan tahminlere ilişkin test sonuçlarını gösteren karmaşıklık matrisi Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.



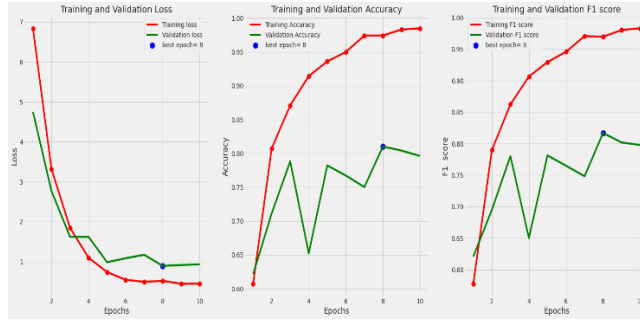
Şekil 5. İkinci uygulama kapsamındaki eğitim kaybı ve doğrulama doğruluğu grafikleri

Cilt Kanseri Görüntüleri Kullanılarak Eğitilen EfficientNet-B3 Mimarisinde Hiperparametre Seçiminin Sınıflandırma Performansına Etkisinin İncelenmesi

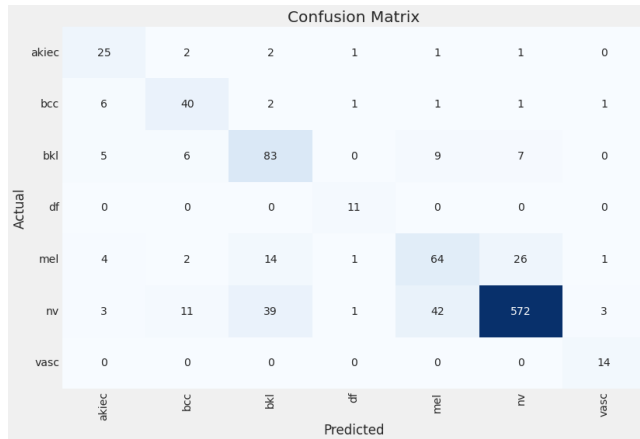


Şekil 6. İkinci uygulama kapsamındaki karmaşıklık matrisi

Üçüncü aşamada da eğitim için her hastalık sınıfından 700 görüntü olacak şekilde kullanılan görüntü sayısı toplam 4.900 olarak belirlendi. Momentumu değiştirmeden ilk değer olarak ImageNet ağırlıkları kullanılarak **öğrenme oranı 0,0022**, epoch 10 ve eğitim için batch değeri 30 seçilmiştir. Eğitim süresi 0 saat 23 dakika 54,32 saniye sürmüştür ve model 0,8074 doğruluk performansı göstermiştir. Uygulamada elde edilen eğitimdeki kayıplar ve doğrulama doğruluğuna ilişkin ölçüm grafikleri ve yapılan tahminlere ilişkin test sonuçlarını gösteren karmaşıklık matrisi Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir.



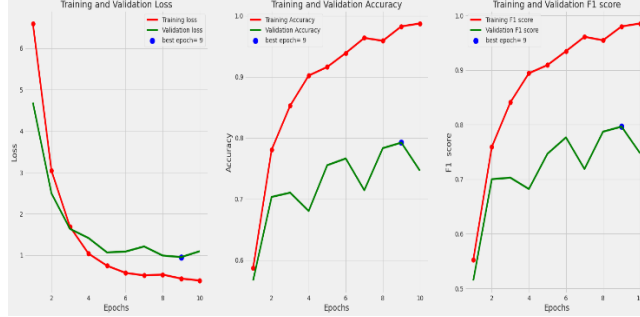
Şekil 7. Üçüncü uygulama kapsamındaki eğitim kaybı ve doğrulama doğruluğu grafikleri



Şekil 8. Üçüncü uygulama kapsamındaki karmaşıklık matrisi

Dördüncü adımda eğitim için her hastalık sınıfından 700 görüntü olacak şekilde kullanılan görüntü sayısı toplam 4.900 olarak belirlendi. Momentumu değiştirmeden ilk değer olarak ImageNet ağırlıkları kullanılarak

**öğrenme oranı 0,0025**, epoch 10 ve eğitim için batch değeri 30 seçilmiştir. Eğitim süresi 0 saat 23 dakika 44,92 saniye sürmüştür ve model 0,8004 doğruluk performansı göstermiştir. Uygulamada elde edilen eğitimdeki kayıplar ve doğrulama doğruluğuna ilişkin ölçüm grafikleri ve yapılan tahminlere ilişkin test sonuçlarını gösteren karmaşıklık matrisi Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



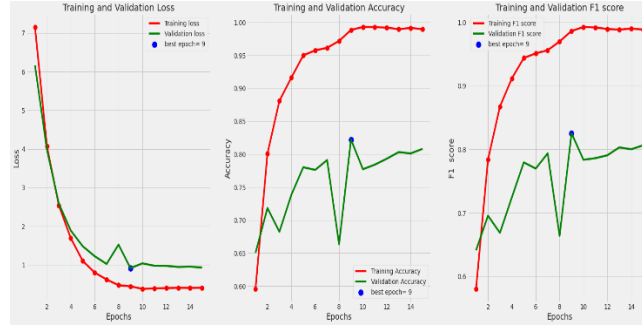
Şekil 9. Dördüncü uygulama kapsamındaki eğitim kaybı ve doğrulama doğruluğu grafikleri

		Confusion Matrix						
		akiec	bcc	bkl	df	mel	nv	vasc
Actual	akiec	27	3	1	1	0	0	0
	bcc	5	44	0	0	2	1	0
	bkl	6	6	81	0	11	6	0
	df	0	1	2	8	0	0	0
	mel	3	0	11	0	83	15	0
	nv	2	13	26	0	78	545	7
	vasc	0	0	0	0	0	0	14
			akiec	bcc	bkl	df	mel	nv
		Predicted						

Şekil 10. Dördüncü uygulama kapsamındaki karmaşıklık matrisi

Beşinci ve son aşamada eğitimde kullanılan görüntü sayılarında azalmaya gidildi. Amaç eğitimde kullanılan görüntü sayılarının da öğrenme oranının etkisi ile birlikte modelin aşırı öğrenme eğilimine girmeden optimal sayının etkileri gösterilmek istenmiştir. Bununla birlikte bu uygulamada aynı zamanda mümkün olduğu kadar artırılmış görüntü kullanılmadan her bir hastalık sınıfından 600 görüntü olacak şekilde eğitimde kullanılan toplam görüntü sayısı 4.200 olarak belirlenmiştir. Momentumu değiştirmeden ilk değer olarak ImageNet ağırlıkları kullanılarak **öğrenme oranı 0,002**, epoch 10 yerine epoch 15 ve eğitim için batch değeri 30 seçilmiştir. Eğitim süresi 0 saat 31 dakika 32,29 saniye sürmüştür ve model 0,8234 doğruluk performansı göstermiştir. Uygulamada elde edilen eğitimdeki kayıplar ve doğrulama doğruluğuna ilişkin ölçüm grafikleri ve yapılan tahminlere ilişkin test sonuçlarını gösteren karmaşıklık matrisi Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterilmiştir.

## Cilt Kanseri Görüntüleri Kullanılarak Eğitilen EfficientNet-B3 Mimarisinde Hiperparametre Seçiminin Sınıflandırma Performansına Etkisinin İncelenmesi



Şekil 11. Beşinci uygulama kapsamındaki eğitim kaybı ve doğrulama doğruluğu grafikleri

		Confusion Matrix						
		akiec	bcc	bkl	df	mel	nv	vasc
Actual	akiec	25	2	3	2	0	0	0
	bcc	1	46	1	0	2	2	0
	bkl	3	7	84	0	11	5	0
	df	0	1	1	9	0	0	0
	mel	2	3	6	0	70	31	0
	nv	2	24	23	0	43	577	2
	vasc	0	0	0	0	0	0	14
			akiec	bcc	bkl	df	mel	nv

Şekil 12. Beşinci uygulama kapsamındaki karmaşıklık matrisi

### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, evrimsel sinir ağlarının eğitiminde kullanılan ve kullanıcı tarafından belirlenen hiperparametrelerden, öğrenme oranının ve eğitimde kullanılacak veri setinin büyüklüğü ve çeşitliliğinin, artırılmış görüntü sayılarının eğitim üzerindeki etkisi gösterilmeye çalışılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Veri setinin büyüklüğüne bağlı olarak eğitim başlangıcında seçilecek olan öğrenme oranının ne çok küçük ne de çok büyük seçilmemesi, veri setine bağlı olarak optimal öğrenme oranı seçilmesi halinde doğruluk oranının arttığı görülmüştür.
- Her ne kadar eğitimde kullanılacak olan veri setinin büyüklüğü ve çeşitliliği önemli olsa da, veri setinin çok büyük olmasından dolayı doğruluk oranının sürekli artan bir grafikte artmadığı, başarının aynı oranda yükselmediği bir noktadan sonra başarıya etkisinin azaldığı görülmüştür.
- Veri setindeki görüntü sayıları eşitlenirken kullanılan artırılmış görüntü sayılarının da başarıya etkisi olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, eğitim için rastgele seçilen görüntülerdeki gürültüler, olumsuzluklar eğitimdeki başarıya etki etmektedir. Veri setindeki çeşitlilik önemli olduğu kadar, her bir sınıftaki görüntü sayılarının da birbirine yakın olması önemlidir. Bir sınıftaki görüntülerden kaydırma, yatay çevirme, yakınlaştırma vb. gibi yöntemler kullanılarak artırılmış görüntüler elde edildiği zaman, görüntüdeki gürültüler ve olumsuzlukların sayısı da artacağından eğitimdeki başarıya olumsuz etkileri olacaktır.

Gelecek çalışmalarda evrimsel sinir ağları eğitilirken, eğitimde kullanılacak veri setindeki görüntüler, filtremeden geçirilerek mümkün olduğu kadar gürültüler ve olumsuzluklar azaltılırsa aynı oranda başarının da artacağı kanaatini taşımaktayız.

## Kaynaklar

- [1] Elgamal, M. Automatic skin cancer images classification, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2013, vol. 4, no. 3 pp:287-294.
- [2] Dildar M, Akram S, İrfan M, Khan HU, Ramzan M, Mahmood AR, Alsaiari SA, Saeed AHM, Alraddadi MO, Mahnashi MH. Cilt Kanseri Tespiti: Derin Öğrenme Tekniklerini Kullanan Bir İnceleme. *Uluslararası Çevre Araştırmaları ve Halk Sağlığı Dergisi* . 2021; 18(10):5479. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105479>
- [3] Key Statistics for Melanoma Skin Cancer. Am. Cancer Soc. Available online: <https://www.cancer.org/content/dam/CRC/PDF/Public/8823.00.pdf> (Erişim Tarihi: 15 November 2023)
- [4] Khan MQ et al., Classification of Melanoma and Nevus in Digital Images for Diagnosis of Skin Cancer, in IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 90132-90144, doi: 10.1109
- [5] Seyyarer, E., Ayata, F., Uçkan, T., Karci, A., Derin öğrenmede kullanılan optimizasyon algoritmalarının uygulanması ve kıyaslanması, Anatolian Journal of Computer Sciences, 2020, Volume 5 No 2 pp:90-98
- [6] Shete, A. S., Rane, A. S., Gaikwad, P. S., & Patil, M. H, Detection of skin cancer using cnn algorithm. International Journal,2021, 6(5), pp:215-218.
- [7] Kasinathan G, Jayakumar S, Gandomi AH, Ramachandran M, Fong SJ, and Patan R. Automated 3-D lung tumor detection and classification by an active contour model and CNN classifier. Expert Systems with Applications,Nov. 2019, vol. 134. Elsevier BV, pp. 112–119, doi: 10.1016/j.eswa.2019.05.041.
- [8] Çarkacı, N. Derin öğrenme Uygulamalarında en Sık Kullanılan Hiper-Parametreler, Medium. Available at: <https://medium.com/deep-learning-turkiye/derin-ogrenme-uygulamalarinda-en-sik-kullanilan-hiper-parametreler-ece8e9125c4> (Erişim Tarihi: 24 November 2023).
- [9] Rakhecha, A. Understanding learning rate, Medium. Available at: <https://towardsdatascience.com/https-medium-com-dashingaditya-rakhecha-understanding-learning-rate-dd5da26bb6de> (Erişim Tarihi: 22 November 2023).
- [10] Çarkacı N. Derin öğrenme Uygulamalarında Hiper parametre seçim yöntemleri, Medium, <https://medium.com/deep-learning-turkiye/derin-ogrenme-uygulamalarinda-model-dogrulama-ve-hiper-parametre-secim-yontemleri-823812d95f3> (Erişim Tarihi : 15 November 2023).
- [11] Deledalle, C, MLIP - chapter 3 - introduction to deep learning PPT. Available at: <https://www.slideshare.net/CharlesDeledalle/mlip-chapter-3-introduction-to-deep-learning> (Erişim Tarihi: 28 November 2023).
- [12] Brownlee, J. Understand the impact of learning rate on neural network performance, MachineLearningMastery.com. Available at: <https://machinelearningmastery.com/understand-the-dynamics-of-learning-rate-on-deep-learning-neural-networks/> (Erişim Tarihi: 05 November 2023).
- [13] Kızrak, A. Keras ile Derin Öğrenmeye Giriş. GitHub. Available at: [https://github.com/ayyucekizrak/Keras-ile-Derin-Ogrenmeye-Giris/blob/master/B%C3%B6lüm4/Optimizasyon\\_Y%C3%B6ntemlerinin\\_Kar%C5%9F%C4%B1la%C5%9F%C4%B1rmas%C4%B1.ipynb](https://github.com/ayyucekizrak/Keras-ile-Derin-Ogrenmeye-Giris/blob/master/B%C3%B6lüm4/Optimizasyon_Y%C3%B6ntemlerinin_Kar%C5%9F%C4%B1la%C5%9F%C4%B1rmas%C4%B1.ipynb) (Erişim Tarihi: 20 November 2023).
- [14] Karar A, Shaikh ZA, Khan AA, Laghari AA. Multiclass skin cancer classification using EfficientNets – a first step towards preventing skin cancer, Neuroscience Informatics, Dec. 2022,vol. 2, no. 4. Elsevier BV, p. 100034, doi: 10.1016/j.neuri.2021.100034.
- [15] Yıldız, O. Derin öğrenme yöntemleriyle dermoskopi görüntülerinden melanom tespiti: Kapsamlı bir çalışma. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 2019, 34.4: 2241-2260.
- [16] Ergün, E. Kılıç, K. Derin öğrenme ile artırılmış görüntü seti üzerinden cilt kanseri tespiti. Black Sea Journal of Engineering and Science, 2021, 4(4). pp 192-200.
- [17] Pham TC, Tran GS, Nghiem TP, Doucet A, Luong CM, Hoang VD. Cilt Kanserinin Sınıflandırılmasına Yönelik Karşılaştırmalı Bir Çalışma, 2019 Uluslararası Sistem Bilimi ve Mühendisliği Konferansı (ICSSE) , 2019,Dong Hoi, Vietnam, s. 267-272, doi: 10.1109/ICSSE.2019.8823124.





## Türkçe Metinlerde Duygu Analizi: Derin Öğrenme Yaklaşımlarının ve Ön İşlem Süreçlerinin Model Performansına Etkisi

Yasin GÖRMEZ<sup>1\*</sup>, Halil ARSLAN<sup>2</sup>, Bilal ATAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye

<sup>3</sup> SAP CX Elektronik Ticaret Geliştirme, Detay Danışmanlık, İstanbul, Türkiye

\*<sup>1</sup> yasingormez@cumhuriyet.edu.tr, <sup>2</sup> harslan@cumhuriyet.edu.tr, <sup>3</sup> bilal.atak@detaysoft.com

(Geliş/Received: 31/01/2024;

Kabul/Accepted: 22/03/2024)

**Öz:** Günümüzde bilgisayar kullanımının artması ile birlikte insanlar daha fazla veri üretmeye başlamış ve verilere ulaşım kolaylaşmıştır. Bu bağlamda e-ticaret sitelerinde, sosyal medyada ya da diğer elektronik platformlarda çok fazla metin verisi üretilmiştir. Toplanan bu verilerin analiz edilerek anlamlandırılması birçok kurum, kuruluş ya da birey için faydalı bilgiler sağlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda duygu analizi günümüzde sıklıkla uygulanmaktadır. Duygu analizi modellerinde derin öğrenme yaklaşımları oldukça yüksek performans göstermekte ve model eğitimi yapılmadan önce metinlere birkaç ön işlem uygulanmaktadır. Bu çalışmada duygu analizi için, evrimsel sinir ağı, Transfomer ve hibrit olmak üzere üç farklı derin öğrenme yaklaşımı önerilmiş ve modeller winvoker ve Beyazperde olmak üzere iki farklı veri seti kullanılarak analiz edilmiştir. Modellerin doğruluğunu artırmak için hiper-parametreleri ve model derinlikleri Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Ön işlem süreçlerinin model performansına etkisini ölçmek için veri setlerine çeşitli ön işlem yapılarak analizler tekrar edilmiştir. Ön işlem uygulanmamış veriler kullanıldığında, winvoker veri seti ile eğitilen modellerde %94,16, Beyazperde veri seti ile eğitilen modellerde ise %86,64 doğruluğa ulaşılmıştır. Ön işlem uygulandığında ise bu başarı oranları, winvoker veri seti ile eğitilen modellerde %94,64, Beyazperde veri seti ile eğitilen modellerde ise %89,08 değerlerine ulaşmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda örnek sayısı daha fazla olan winvoker veri seti için ön işlemlerin etkisinin azaldığı ve doğruluğun daha yüksek olduğu sonucu çıkarılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Duygu analizi, derin öğrenme, metin ön işlem, evrimsel sinir ağları, transfomer ağları.

### Sentiment Analysis in Turkish Texts: The Effect of Deep Learning Approaches and Preprocessing Processes on Model Performance

**Abstract:** Nowadays, with the increased use of computers, a surge in data production has emerged, making data access more convenient. In this context, a substantial amount of textual data is generated on e-commerce sites, social media, and various electronic platforms. Analyzing and extracting meaningful insights from this amassed data proves valuable for numerous institutions, organizations, and individuals. Sentiment analysis is a commonly employed technique to derive sentiments from textual data, and contemporary sentiment analysis models often leverage the high performance offered by deep learning approaches. Prior to model training, several pre-processing steps are typically applied to the text data. In this study, three distinct deep learning approaches were proposed for sentiment analysis. These models were analyzed on two different datasets: winvoker and Beyazperde. Hyper-parameters and depth of models were optimized using the Bayesian optimization method to enhance the accuracy of model. Additionally, the impact of various pre-processing techniques on model performance were assessed. When non-preprocessed data is utilized, the models trained on the winvoker dataset achieve an accuracy of 94.16%, while those trained on the Beyazperde dataset reach 86.64%. With the application of pre-processing, these accuracies improve to 94.64% for the winvoker dataset and 89.08% for the Beyazperde dataset. Based on these findings, it was concluded that the effect of pre-processing decreased and the accuracy was higher for the winvoker data set with a higher number of samples.

**Key words:** Sentiment analysis, deep learning, text pre-processing, convolutional neural networks, transformer networks.

#### 1. Giriş

Duygu Analizi (Sentiment Analysis - SA), doğal dil işleme ve metin madenciliği tekniklerini kullanarak bir metindeki öznel bilgileri tanımlamak olarak ifade edilmektedir [1]. SA yardımıyla geliştirilen uygulamalar, bireyler, firmalar ve devletler tarafından kullanılmakta ve kullanımını gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle sosyal medya verilerini kullanarak bir konu hakkında fikir çıkarımı yapılması ya da ürün yorumlarının otomatik analiz edilmesi gibi süreçlerde sıklıkla kullanılmaktadır [2]. E-ticaret sistemlerinin kullanımının artmasıyla birlikte ürün yorumlarına SA tekniklerinin uygulanması da giderek artmakta ve gelecekte de popülerliğini koruyacağı ön görülmektedir. İnternet kullanımının yaygınlaşması ve internet sitelerinden veri toplama araçlarının çoğalmasıyla

\* Sorumlu yazar: [yasingormez@cumhuriyet.edu.tr](mailto:yasingormez@cumhuriyet.edu.tr), Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-8276-2030, <sup>2</sup> 0000-0003-3286-5159, <sup>3</sup> 0009-0002-6157-2849

birlikte toplanan metin verisi sayısı da artmıştır. Bu veriler genellikle kullanıcılar tarafından üretilmekte ve çok fazla gürültü içerebilmektedir [3]. Bunun yanı sıra, kullanıcılar tarafından oluşturulan verilerde dil bilgisi kuralına çok fazla uyulmaması verilerdeki bozulmanın artmasına neden olmaktadır. Verilerde meydana gelen bu bozulmaları en aza indirmek ve SA yöntemlerinin başarı oranlarını artırmak için ise metin normalleştirme yöntemlerine başvurulmaktadır [4].

Toplanan verilerin ait olduğu dilin özellikleri, oluşturulan SA modelin performansını doğrudan etkilemektedir. Bir dilin bükümlü ya da eklemeli dil grubunda yer alması ön işlem süreçlerinin değişmesine neden olabilmektedir. Bir dil grubu için oluşturulmuş olan modelin diğer dil grubunda iyi sonuçlar vermemesi olası bir durum olarak değerlendirilmektedir ve dil gruplarına uygulanan ön işlemlerin zorlukları da değişebilmektedir. Örneğin, bükümlü dil grubunda giren İngilizce için ön işlem süreçleri, eklemeli dil grubunda yer alan Türkçeye göre daha kolay olabilmektedir [5]. Bu kapsamda, Türkçe gibi morfolojik açıdan zengin olan dillerde SA yapmak daha zordur ve bu zorluktan dolayı Türkçe dilinde yapılan SA çalışmaları henüz istenilen seviyelere ulaşamamıştır [6].

SA, doküman, cümle, deyim ve hedef tabanlı olmak üzere dört üst başlıkta incelenebilmektedir [3]. Bu başlıklar altında günümüze kadar SA için teori ve pratikte oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Singh ve arkadaşları üç farklı veri setinde Naive Bayes, J-48, BFTree ve OneR yöntemlerini karşılaştırdıkları çalışmada, OneR yönteminin IMDB veri setinde seti üzerinde doğruluk ve F1 metriklerinde diğer yöntemlere üstünlük sağladığı kanısına varmışlardır [7]. Jagdale ve arkadaşları Amazon e-ticaret platformundan toplanan elektronik ürün yorumları veri setinde Naive Bayes ve Destek vektör makinaları yöntemlerinde sırasıyla %98,17 ve %93,54 doğruluk elde etmişlerdir [8]. Jain ve Dandannavar Apple, ICICI ve BSNL olmak üzere üç farklı veri seti üzerinde karar ağacı ve Multinomial Naive Bayes yöntemleri eğiterek %76 ile %100 arasında doğruluk elde etmişlerdir [9]. Gupta ve diğerleri film yorumları veri seti üzerine önce ön işlem uygulamış daha sonra sekiz farklı makine öğrenmesi modeli eğitmişlerdir. Yaptıkları analiz sonucunda en düşük doğruluğu %66 ile Naive Bayes algoritmasının, en yüksek doğruluğu ise %90 ile Maksimum Entropi ve topluluk yöntemlerinin elde ettiğini göstermişlerdir [10]. Shamantha ve diğerleri Twitter üzerinden topladıkları verileri kullanarak Naive Bayes, Destek Vektör Makinaları ve Rastgele Orman algoritmaları modellerini eğitmiş ve %60 ile %70 arasında değişen oranlarda doğruluk elde etmişlerdir. Bunun yanı sıra toplanan veri sayısı arttıkça doğrulukta da iyileşme olduğunu belirtmişlerdir [11]. Naresh ve Venkata Krishna önerdikleri karar ağacıyla sıralı minimum optimizasyon yöntemiyle Twitter verisi üzerinde %89,47 doğruluk elde etmişlerdir [12].

Geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinin yanı sıra derin öğrenme yaklaşımları kullanılarak da SA için oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Araque ve arkadaşları el ile çıkarılan öznitelikleri, otomatik çıkarılan öznitelikler ile birleştirdikleri çalışmada önerdikleri derin öğrenme modeliyle PL04 veri setinde %94,49 F1 skoruna ulaşmışlardır [13]. Jianqiang ve arkadaşları kelime gömme, n-gram ve kelime duyarlılığı polarite puanı özniteliklerini birleştirerek eğittikleri derin evrimsel sinir ağı (Convolutional Neural Network - CNN) modelini kullanarak beş farklı Twitter veri setinde ortalama %85,63 doğruluk elde etmişlerdir [14]. Xu ve diğerleri önerdikleri uzun kısa vadeli ağlar (Long Short-Term Memories - LSTM) tabanlı derin öğrenme modeliyle otel verisi üzerinde kesinlik, duyarlılık ve F1 skor metriklerinde sırası ile %91,54, %92,82 ve %92,18 değerlerini elde etmişlerdir [15]. Zhao ve arkadaşları önerdikleri CNN ve LSTM tabanlı derin öğrenme modellerinde ürün yorum veri setinde sırası ile %87,70 ve %87,90 doğruluk elde etmişlerdir [16]. Basiri ve arkadaşları dikkat temelli çift yönlü CNN ve LSTM kullanarak geliştirdikleri model ile App, CD, Movie, Twitter, Electronics ve Sentiment140 veri setlerinde sırası ile %92,18, %88,70, %90,55, %92,75, %90,65 ve %81,82 doğruluk elde etmişlerdir [17]. Mishev ve diğerleri finansal verilerde duygu analizi için önerdikleri Transformer tabanlı modellerle SNLI veri setinde %94,79 doğruluğa ulaşmışlardır [18]. Naseem ve arkadaşları önerdikleri Transformer tabanlı model sayesinde havayolu firmalarına yapılan yorumları %96,20'ye varan başarı oranları ile sınıflandırmışlardır [19]. Zhang ve diğerleri önerdikleri geniş çok görevli Transformer ağları tabanlı derin model kullanarak Twitter veri setinde %77,80 F1 skor ve Stanford Sentiment Treebank veri setinde %94,00 doğruluk elde etmişlerdir [20]. Myagmar ve arkadaşları çift yönlü Transformer ağlarını kullanarak önerdikleri dil modeli sayesinde alanlar arası duygu analizinde başarı oranını Amazon veri seti için 120 kat daha az örnek kullanarak artırmışlardır [21]. Potamias ve diğerleri, önceden eğitilmiş derin modeli, tekrarlayan CNN ile birleştirerek SemEval-2018, Reddit Politics, Sarcastic Rillof's ve SemEval-2015 veri setlerinde sırasıyla %82, %79, %91 ve %81 doğruluk elde etmişlerdir [22]. Murfi ve arkadaşları Endonezya dilinde duygu analizi için önerdikleri BERT tabanlı derin modelde %87,68 doğruluğa ulaşmışlardır [23]. Liu ve arkadaşları, BERT yöntemini kullanarak geliştirdikleri çok modlu duygu analizi modeliyle IEMOCAP veri setinde %86,14 doğruluğa ulaşmışlardır [24].

Model eğitmek için kullanılan veri setinin oluşturulduğu dil SA için önemli bir parametredir. SA yapılmak istenen dile göre farklı süreç ya da modellerin kullanılması gerekebilmektedir. Bu kapsamda literatürde Türkçe dili özelinde yapılmış birçok çalışmada farklı süreçlerin yürütüldüğü görülmektedir. Dehkharghani ve arkadaşları, polarite sözlüğü yaklaşımı kullanarak öznitelik çıkarımı yaptıkları çalışmada sıralı minimum optimizasyon algoritması, yapay sinir ağları ve lojistik regresyon modellerinde sırasıyla %82,89, %83,32 ve %83,13 doğruluk

elde etmişlerdir [25]. Salur ve Aydın, Türkçe Twitter veri seti üzerine çeşitli ön işlem yöntemleri uygulamış ve farklı yöntemler kullanarak öznelik çıkarımı yapmışlardır. Önerdikleri farklı derin öğrenme modellerini eğiterek %75,71'e varan başarı oranları elde etmişlerdir [26]. Ayvaz ve diğerleri, yaptıkları çalışmada Twitter üzerinden bir yarışma programı hakkında yazılan yorumları toplayarak veri seti oluşturmuşlardır. Oluşturdukları veri setine ön işlem uygulayarak duygu analizi yapmışlar ve kullanıcı duygularını mevsimlerinde etkilediği kanaatine varmışlardır [27]. Çetin ve Eryiğit hedef tabanlı duygu analizi için önerdikleri koşullu rastgele alanlar modelini, kelime bölütleyici, Türkçe karakter düzeltici, morfolojik çözümleyici, morfolojik belirsizlik giderici ve bağlılık ayrıştırıcısı gibi ön işlem yöntemlerini uyguladıkları veri seti ile eğiterek %66,7 F1 skoruna ulaşmışlardır [28]. Onan, yapmış olduğu çalışmada CNN katmanını kullanarak geliştirdiği derin öğrenme modellerini farklı öznelik çıkarma yöntemleri kullanarak analiz etmiş ve en yüksek doğruluğu %92,53 ile CNN tabanlı Word2vec modeli ile elde etmiştir [29]. Tuzcu çalışmasında, çevrimiçi kitap satış sitesinde yapılan yorumlardan oluşan veri setinde eğittiği çok katmanlı algılayıcı, Naive Bayes, destek vektör makinaları ve lojistik regresyon modellerinde sırasıyla %89, %77,57, %80,93 ve %84,07 doğruluk elde etmiştir [30].

Literatür incelendiğinde yapılan SA çalışmalarında, analizlerin yapıldığı dile bağlı olarak çok fazla ön işlem aşaması olduğu görülmektedir. Türkçe gibi eklemeli grupta yer alan bir dilde ise, ön işlem için geliştirilen modellerde de hata oranları yüksek olabilmektedir. Bunun yanı sıra birçok ek analizin yapılması gereksinimi ortaya çıkmakta bu nedenle zaman ve kaynak kayıpları yaşanabilmektedir. Literatür araştırmasından çıkan diğer bir sonuç ise, derin öğrenme yaklaşımlarının geleneksel modellere göre daha başarılı sonuçlar elde ettiğidir. Bu çalışmada Türkçe SA için üç farklı özgün derin öğrenme modeli Transformer ve CNN katmanları kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen derin öğrenme modellerini eğitmek için winvoker [31] ve Beyazperde [32] olmak üzere iki farklı veri seti kullanılmıştır. Geliştirilecek bir SA modeli, özellikle e-ticaret sitelerinde ürünlerin karşılaştırılması, ürünlerin eksiklerinin anlaşılması ve ürün hakkında genel algıların tespit edilebilmesi için kullanılabilir. Bu kapsamda önerilen modelin e-ticaret siteleri ile entegre bir şekilde çalışarak ürünler hakkındaki yorumların genel anlamını çıkarması istenmektedir. Bu nedenle yorum içeren iki farklı veri seti tercih edilmiştir. İlk veri setinde sadece olumlu ve olumsuz ayrımı yapılırken, ikinci veri setinde olumlu, olumsuz ve nötr ayrımı yapılabilmektedir. Bu sayede farklı sınıf sayılarında SA modellerinin performansının da ölçülmesi amaçlanmaktadır. Bu veri setlerine çeşitli ön işlem aşamaları uygulanmış ve yeni veri setleri oluşturulmuştur. Her bir makine öğrenmesi modeli hem ön işlem uygulanmış hem de uygulanmamış veri setleri kullanılarak eğitilmiştir. Önerilen modellerin çeşitli hiper-parametreleri ve derinlikleri Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın ilk amacı Transformer ve CNN tabanlı derin öğrenme modellerinin Türkçe SA analizindeki performanslarının ölçülmesidir. Çalışmanın ikinci amacı ise, ön işlem süreçlerinin derin öğrenme modellerinin performansına etkisinin hesaplanmasıdır. Çalışmaya ait derin öğrenme modellerinin geliştirilecek olması ve ön işlem süreçlerinin Türkçe SA için karşılaştırılacak olması ise çalışmanın özgün yanları olarak değerlendirilmektedir.

## 2. Veri Seti ve Yöntemler

### 2.1. Veri Seti

Çalışmamızda winvoker [31] ve Beyazperde [32] olmak üzere iki farklı veri seti kullanılarak analizler yapılmıştır. Winvoker veri seti, humir [33], e-ticaret sitesi yorumları ve Wikipedia gibi farklı kaynaklardan derlenmiş 262.166 pozitif, 56.561 negatif ve 170.917 nötr sınıfına ait olmak üzere toplam 489.644 örnekten oluşmaktadır. Beyazperde veri seti ise, 5.331 pozitif ve 5.331 negatif sınıfa ait olmak üzere toplam 10.662 film yorumundan oluşmaktadır. Bu veri setleri sayesinde herhangi bir ürün hakkında ya da bir olaya yapılan yorumların olumluluk ve olumsuzluk durumlarını ölçebilen sistemlerin eğitilmesi mümkün olmaktadır. Çalışmamızın amaçlarından bir diğeri olan, e-ticaret sistemlerinde yapılan yorumların analizi için ilgili veri setlerinin uygun olduğu kanaatine varılmıştır. Veri setleri hakkındaki detaylı bilgilere verilen referanslardan ulaşılabilmektedir.

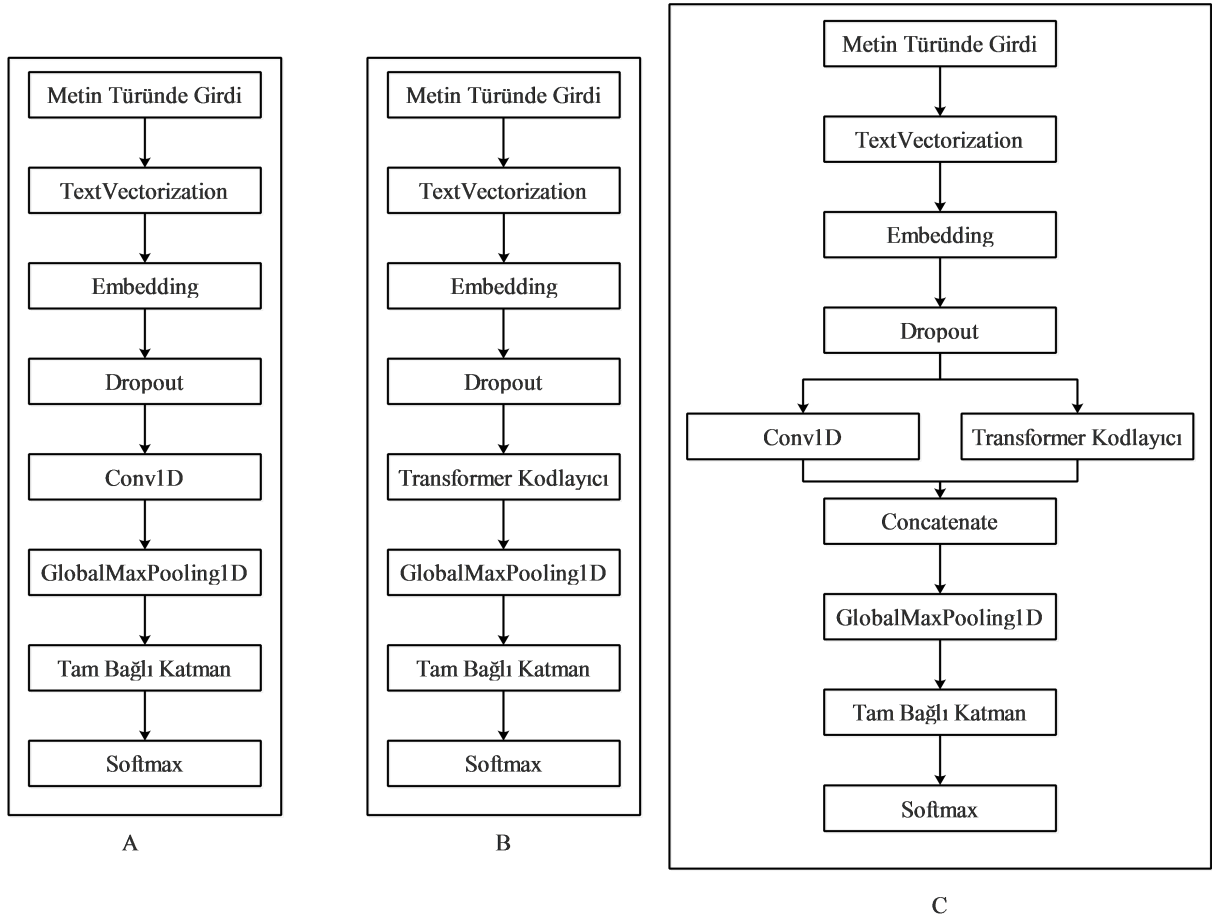
### 2.2. Metin Ön İşleme

Çalışmanın amaçlarından biri olan, ön işlem tekniklerinin derin öğrenme modellerinin performansına etkisini ölçmek için kullanılan veri setlerine ön işlem teknikleri uygulanarak temizleme işlemi yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak, veri setindeki örneklerde bulunan html işaretleri temizlenmiştir. Daha sonra bu örnekler noktalama işaretlerinden ve etkisiz kelimelerden (stop words) arındırılmıştır. Bu aşamada noktalama işaretlerini tanımlamak için python dilinde bulunan string kütüphanesi kullanılırken [34], Türkçe etkisiz kelimeleri tanımlamak için python dilinde bulunan nltk kütüphanesi kullanılmıştır [35]. Ön işlemin üçüncü aşamasında ise temizlenmiş örneklere metin normalleştirme uygulanmıştır. Kullanılan veri setlerindeki içerikler birçok farklı kullanıcıdan elde edilmiştir ve bu kullanıcıların genellikle yazım kurallarına dikkat etmediği görülmüştür. Kelime yanlış yazımı, olmayan

kelime kullanımı ya da eksik harf kullanma gibi durumlarla sıklıkla karşılaşmaktadır. Metin normalleştirme sayesinde kullanıcılar tarafından hatalı bir şekilde oluşturulan içeriklerin düzenlenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmada, metin normalleştirme için python dilinde var olan zemberek kütüphanesi kullanılmıştır [36]. Ön işlemin son aşamasında ise veri setinde üç kereden daha az geçen kelimeler elenerek metin boyutları düşürülmüştür.

### 2.3. Derin Öğrenme Modelleri

Çalışmamızda duygu analizi için üç farklı derin öğrenme modeli CNN ve Transformer katmanları kullanılarak geliştirilmiştir. Kullanılan bu katmanlar, TextVectorization, Embedding ve tam bağlı katmanlarla da desteklenmiştir. TextVectorization, Embedding ve tam bağlı katmanların yanı sıra, bu modellerin ilki sadece CNN kullanarak, ikincisi sadece Transformer kullanarak, üçüncüsü ise CNN ve Transformer katmanlarını hibrit bir şekilde kullanarak geliştirilmiştir. Her bir model için mimari yapı şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Önerilen derin öğrenme modellerinin mimari yapıları. A: CNN model, B: Transformer Model, C: Hibrit Model

Şekil 1’de gösterilen mimari yapılar, CNN ve Transformer katmanlarının bir kez kullanıldığı modeller gösterilmektedir. Çalışmada eğitilen modellerde ise CNN ve Transformer katman sayıları her bir veri setinde ayrı ayrı optimize edilmiştir. Modellerde kullanılan katman sayıları deney sonuçları kısmında sunulmaktadır. Önerilen modellerin python dilinde var olan keras kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir [37]. Bu modellerin TextVectorization katmanında *max\_tokens* parametresi 20.000, *output\_sequence\_length* parametresi ise 500 olarak ayarlanmıştır. Sınıflandırma katmanı hariç, tüm katmanların aktivasyon fonksiyonu (activation function) *relu*, sınıflama katmanının aktivasyon katmanı *softmax*, kayıp fonksiyonu (loss function) *categorical\_crossentropy*, optimizer ise *Adam* olarak ayarlanmıştır. Transformer kodlayıcı ise iki ana modülden oluşmaktadır. İlk modül, MultiHeadAttention, Dropout ve LayerNormalization katmanlarının seri olarak birbirine bağlanması ile oluşturulmuştur. Daha sonra bu modülün çıktısı, ikinci modülün girdisi olarak kullanılmak üzere girdi ile birleştirilmiştir. İkinci modülde ise sırası ile seri şekilde bağlı CNN, Dropout, CNN ve

LayerNormalization katmanları bulunmaktadır. Bu modülde bulunan CNN katmanlarının çekirdek genişliği (Kernel Size) 5 olarak ayarlanmıştır, birim sayıları ise optimize edilmiştir. Modellerdeki katmanlara özgü hiper-parametreler ise optimize edilmiştir. Optimizasyon süreçlerine ait detaylı bilgi deney sonuçları kısmında verilmiştir.

### 3. Deneysel Sonuçları

Deneylerin ilk aşamasında SA için kullanılacak veri setleri bölütlenerek eğitim, test ve validasyon veri setleri oluşturulmuştur. Veri setlerinin indirildiği kaynaklarda, her iki veri setinin de eğitim ve test olmak üzere hali hazırda bölütlendiği görülmektedir [31], [32]. Bu duruma ek olarak çalışmada, validasyon veri seti, indirilen eğitim veri seti içerisinde rastgele %20 örnek seçilerek oluşturulmuştur. Kalanlar ise çalışmada kullanılacak eğitim veri setini oluşturmak üzere kullanılmıştır. Eğitim veri seti modelleri eğitmek, validasyon veri seti hiper-parametre optimizasyonu aşamasında ve gerçeğe çağırma fonksiyonlarında performans hesaplamak, test veri seti ise eğitilmiş modellerin performanslarını hesaplamak için kullanılmıştır. Her bir veri setinin sınıflara ait örnek sayıları tablo 1’de gösterilmektedir.

**Tablo 1.** Bölütleme aşamasından sonra oluşturulan veri setlerinde sınıflara ait örnek sayıları.

Veri Seti Adı	Veri Seti Türü	Olumsuz	Nötr	Olumlu	Toplam
winvoker	Eğitim	40 521	123 243	188 780	<b>352 544</b>
	Validasyon	10 384	30 582	47 169	<b>88 135</b>
	Test	5 656	17 092	26 217	<b>48 965</b>
BeyazPerde	Eğitim	3 208	0	3 189	<b>6 397</b>
	Validasyon	790	0	809	<b>1 599</b>
	Test	1 333	0	1 333	<b>2 666</b>

Veri seti bölütleme aşamasından sonra ön işlem uygulanmamış veri setleri kullanılarak hiper-parametre optimizasyonu yapılmıştır. Bu aşamada derin öğrenme modellerinde, ızgara ve rastgele arama gibi diğer hiper-parametre optimizasyon yöntemlerine göre üstünlüğü kanıtlanmış olan Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılmıştır [38], [39], [40]. Bayesian optimizasyon yöntemini geliştirmek için python dilinde var olan skopt kütüphanesi kullanılmıştır [41]. Bu kütüphanede var olan *gp\_minimize* fonksiyonu, Gauss süreç regresyonuna dayalı yöntemle optimizasyon sürecini yönetmektedir. Bu yöntemin edinim fonksiyonu (Acquisition Functions – *acq\_func*) parametresi *EI* (beklenen iyileşme), çağırılma sayısı (*n\_calls*) parametresi ise 25 olarak ayarlanmıştır. *gp\_minimize* fonksiyonu bir hiper-parametre uzayı almakta ve bu uzay içerisindeki en uygun hiper-parametre değerlerini istenen performans skoruna göre hesaplamaktadır. Bu çalışmada performans skoru  $\frac{\text{sensitivity} + \text{specificity}}{2}$  olarak belirlenmiştir. Ön işlem uygulanmamış veri setleri optimize edilen hiper-parametre türleri, hiper-parametre uzayları ve en uygun hiper-parametre değerleri tablo 2’de gösterilmektedir.

Tablo 2’de yer alan öğrenme adımı, her yinelemedeki adım boyutunu (learning rate); CNN birim sayısı, CNN katmanındaki filtre sayısını (filters); CNN katman derinliği, kullanılan CNN modül sayısını; CNN katmanı çekirdek genişliği, evrişim penceresinin boyutunu (kernel\_size); tam bağlı katman birim sayısı, sınıflama katmanından önceki tam bağlı katman nöron sayısını (number of units); devir sayısı, tüm veri üzerinde yapılan bir yinelemeyi (epoch); transformer katman derinliği, kullanılan transformer modül sayısını; dikkat katman sayısı, MultiHeadAttention katmanı için birim sayısını (num\_heads); dikkat katman genişliği ise MultiHeadAttention katmanındaki her birimin boyutunu (key\_dim) temsil etmektedir. Hibrit modelde iki adet optimum CNN birim sayısı verilmesinin nedeni, hem model içindeki CNN katmanlarının birim sayısının hem de Transformer modülü içerisinde bulunan CNN katmanlarının birim sayısının optimize edilmiş olmasıdır. Bu bağlamda ilk değer, CNN modülünde birim sayısını, ikinci değer ise Transformer modülünde bulunan CNN modüllerinin birim sayısını göstermektedir.

Hiper-parametre optimizasyonu tamamlandıktan sonra her bir model, ön işlem yapılmamış eğitim veri seti kullanılarak eğitilmiş ve model performansları test veri setinde hesaplanmıştır. Bu aşamada modele öğrenme adımı (*lr\_callback*) ve erken durdurma (*early\_stopping\_callback*) olmak üzere iki adet geri çağırma fonksiyonu da eklenmiştir. *lr\_callback*, validasyon veri setinde elde edilen kayıp değerinde iki devir boyunca iyileşme olmaz ise öğrenme adımının iki ile bölünmesini sağlarken; *early\_stopping\_callback*, validasyon veri setinde elde edilen kayıp değerinde altı devir boyunca iyileşme olmaz ise eğitimin durmasını sağlamaktadır. Tablo 3’te, her bir model için test veri seti üzerinde elde edilmiş doğruluk (accuracy), kesinlik (precision), f1-skor, ve duyarlılık (recall)

değerleri gösterilmektedir. Kullanılan metriklerin hesaplama formülleri için sklearn kütüphanesinde metrics kütüphanesi kullanılmıştır [42].

**Tablo 2.** Ön işlem uygulanmamış veri setleri için hiper-parametre optimizasyon detayları.

Hiper-Parametre Adı	Hiper-Parametre Türü	Uzay Aralığı	Model Adı	Veri Seti Adı	Optimum Değer
Öğrenme adımı	Gerçek değer	En büyük: $10^{-1}$ , En küçük: $10^{-4}$	CNN	winvoker	0.00057122
				Beyazperde	0.00027370
			Transformer	winvoker	0.00181879
				Beyazperde	0.06358986
			Hibrit	winvoker	0.01153229
				Beyazperde	0.00154756
CNN birim sayısı	Tamsayı	En büyük: 16 En küçük: 256	CNN	winvoker	90
				Beyazperde	256
			Transformer	winvoker	256
				Beyazperde	71
			Hibrit	winvoker	16, 238
				Beyazperde	82, 111
CNN katman derinliği	Tamsayı	En büyük: 1 En küçük: 10	CNN	winvoker	2
				Beyazperde	2
			Hibrit	winvoker	9
				Beyazperde	5
CNN katmanı çekirdek genişliği	Tamsayı	En büyük: 3 En küçük: 15	CNN	winvoker	13
				Beyazperde	14
			Hibrit	winvoker	11
				Beyazperde	9
Tam bağlı katman birim sayısı	Tamsayı	En büyük: 100 En küçük: 1500	CNN	winvoker	1219
				Beyazperde	335
			Transformer	winvoker	100
				Beyazperde	1168
			Hibrit	winvoker	100
				Beyazperde	426
Devir sayısı	Tamsayı	En büyük: 4 En küçük: 100	CNN	winvoker	96
				Beyazperde	34
			Transformer	winvoker	89
				Beyazperde	4
			Hibrit	winvoker	100
				Beyazperde	25
Transformer katman derinliği	Tamsayı	En büyük: 1 En küçük: 10	Transformer	winvoker	1
				Beyazperde	1
			Hibrit	winvoker	1
				Beyazperde	2
Dikkat katmanı sayısı	Tamsayı	En büyük: 1 En küçük: 10	Transformer	winvoker	10
				Beyazperde	1
			Hibrit	winvoker	1
				Beyazperde	1
Dikkat katmanı genişliği	Tamsayı	En büyük: 16 En küçük: 256	Transformer	winvoker	256
				Beyazperde	251
			Hibrit	winvoker	192
				Beyazperde	129

**Tablo 3.** Ön işlem uygulanmamış veri setleri ile eğitilen modellerin performans skorları

Model Adı	Veri Seti	Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1-skor (%)
CNN	winvoker	94,15	92,46	88,66	90,28
	Beyazperde	<b>86,64</b>	87,72	<b>85,52</b>	<b>86,45</b>
Transformer	winvoker	93,98	<b>92,77</b>	88,25	90,11
	Beyazperde	83,98	86,24	80,87	83,46
Hibrit	winvoker	<b>94,16</b>	91,75	<b>89,58</b>	<b>90,58</b>
	Beyazperde	86,23	<b>89,98</b>	81,54	85,55

Tablo 3'te gösterilen sonuçlar incelendiğinde, winvoker veri setinde hesaplanan performans skorlarının, Beyazperde veri setinde hesaplanan performans skorlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun winvoker veri setinde daha fazla örnek olmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Tabloda koyu olan değerler iki veri seti içinde her bir metrik türünde en yüksek skoru elde eden modeli belirtmektedir. Winvoker veri seti hibrit model ile kesinlik hariç diğer metriklerde en yüksek skorları elde ederken, Beyazperde veri seti kesinlik hariç diğer metriklerde CNN modeli ile en yüksek skorları elde etmiştir. Ön işlem uygulanmamış veri setleri ile yapılan analizler tamamlandıktan sonra, metin ön işlem bölümünde anlatılan aşamalar veri setlerine uygulanarak yeni veri setleri oluşturulmuştur. Daha sonra ön işlem uygulanmamış veri setlerindeki ayarların ve uzay aralıklarının aynı kullanılarak modellere hiper-parametre optimizasyonu yapılmıştır. Ön işlem uygulanmış veri setleri için en uygun hiper-parametre değerleri tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4'te de CNN birim sayısı için hibrit modellerde iki tane olma sebebi hem CNN modülünde hem de transformer modülünde var olan CNN katmanlarının birim sayılarının optimize edilmesidir. Bu bağlamda ilk değer CNN katmanındaki, ikinci değer ise Transformer modülünde bulunan CNN katmanının birim sayısını vermektedir. Hiper-parametre optimizasyonu tamamlandıktan sonra her bir model, ön işlem yapılmış eğitim veri seti kullanılarak eğitilmiş ve model performansları test veri setinde hesaplanmıştır. Model eğitimleri aşamasında hiper-parametreler hariç ön işlem yapılmamış veri setindeki modeller ile aynı ayarlar kullanılmıştır. Tablo 5'te, her bir model için test veri seti üzerinde elde edilmiş doğruluk, kesinlik, f1-skor, ve duyarlılık değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5'te gösterilen sonuçlar incelendiğinde, ön işlem uygulanmamış veri seti sonuçlarına benzer şekilde winvoker veri setinde hesaplanan performans skorlarının, Beyazperde veri setinde hesaplanan performans skorlarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Tabloda koyu olan değerler iki veri seti içinde her bir metrik türünde en yüksek skoru elde eden modeli belirtmektedir. Winvoker veri seti için hibrit model ile kesinlik hariç diğer metriklerde en yüksek skorlar elde edilirken, Beyazperde veri seti için CNN modeli ile doğruluk ve f1-skor metriklerinde en yüksek skorlar elde edilmiştir. Bu yapısı ile de sonuçlar ön işlem uygulanmamış veri seti sonuçlarına benzemektedir.

Ön işlem uygulanmamış ve ön işlem uygulanmış veri setleri ile eğitilen modeller kullanılarak hesaplanan başarı oranları karşılaştırıldığında winvoker veri seti için CNN ve hibrit modeller ön işlem uygulanmış veri seti ile eğitildiğinde daha iyi sonuç verirken, Transformer modeli ön işlem uygulanmamış veri seti ile eğitildiğinde daha iyi sonuç vermiştir. Winvoker veri seti için aradaki doğruluk farkları ise %0,27 ile %0,48 arasında değişiklik göstermektedir. Beyazperde veri setinde ise tüm modeller ön işlem uygulanmış veri seti ile eğitildiğinde daha yüksek başarı oranları elde etmiştir. Beyazperde veri setindeki doğruluk farkları ise %1,69 ile %2,65 arasında değişiklik göstermektedir. Model performanslarının daha sağlıklı değerlendirilebilmesi için farklı metrikler kullanılarak karşılaştırılma yapılması büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, veri setlerindeki her bir sınıf türü için şekil 2'de gösterilen kesinlik vs. duyarlılık eğrisi çizilerek, sınıf bazında model performansları karşılaştırılmıştır.

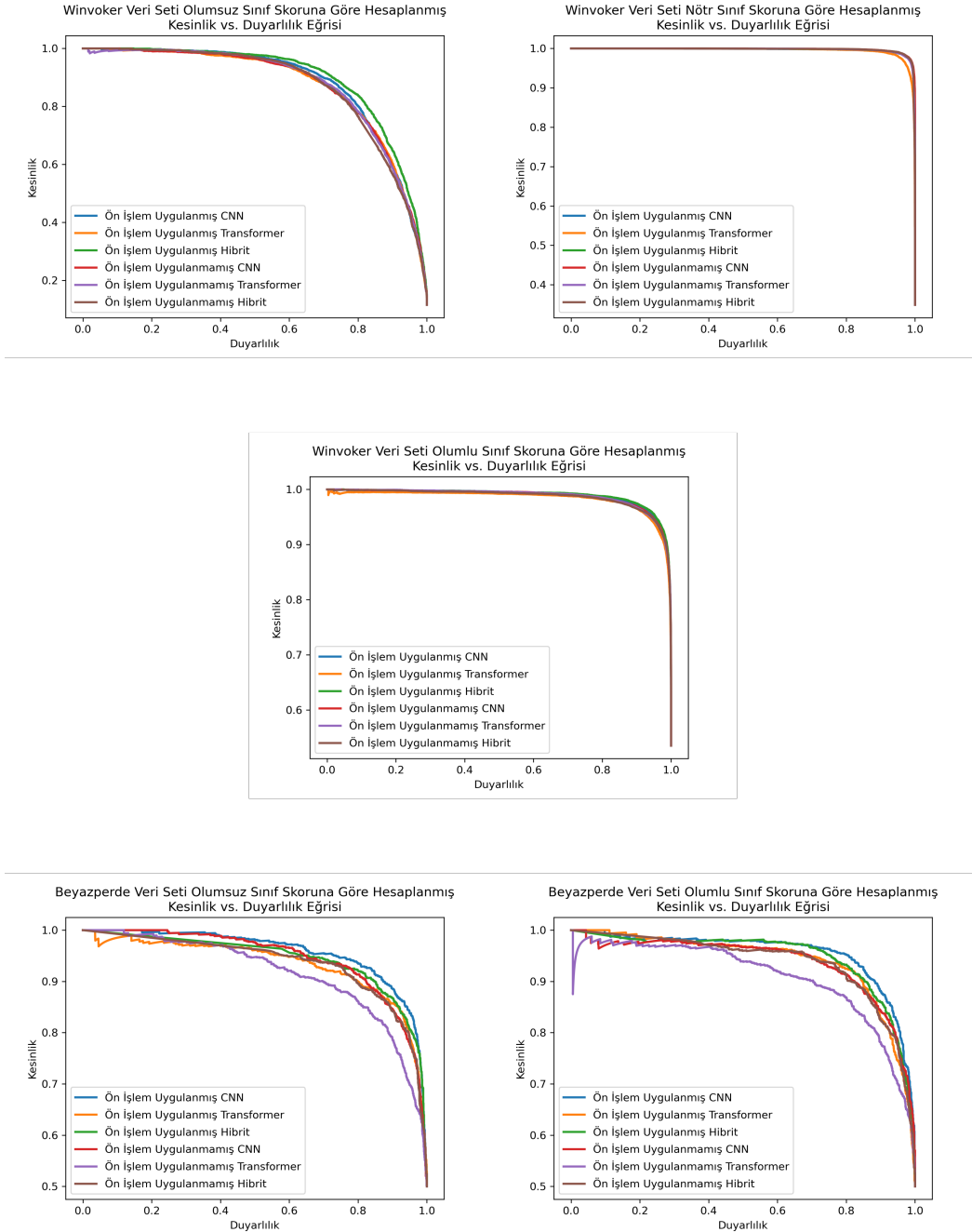
**Tablo 4.** Ön işlem uygulanmış veri setleri için en uygun hiper-parametre değerleri.

Hiper-Parametre Adı	Model Adı	Veri Seti Adı	Optimum Değer
Öğrenme adımı	CNN	winvoker	0.00096460
		Beyazperde	0.0001
	Transformer	winvoker	0.0001
		Beyazperde	0.00606042
	Hibrit	winvoker	0.00087595
		Beyazperde	0.00036356
CNN birim sayısı	CNN	winvoker	232
		Beyazperde	183
	Transformer	winvoker	16
		Beyazperde	246
	Hibrit	winvoker	256, 256
		Beyazperde	255, 53
CNN katman derinliği	CNN	winvoker	1
		Beyazperde	1
	Hibrit	winvoker	10
		Beyazperde	1
CNN katmanı çekirdek genişliği	CNN	winvoker	11
		Beyazperde	15
	Hibrit	winvoker	15
		Beyazperde	10
Tam bağlı katman birim sayısı	CNN	winvoker	334
		Beyazperde	1500
	Transformer	winvoker	144
		Beyazperde	686
	Hibrit	winvoker	1277
		Beyazperde	1500
Devir sayısı	CNN	winvoker	27
		Beyazperde	100
	Transformer	winvoker	4
		Beyazperde	10
	Hibrit	winvoker	4
		Beyazperde	81
Transformer katman derinliği	Transformer	winvoker	2
		Beyazperde	1
	Hibrit	winvoker	1
		Beyazperde	9
Dikkat katmanı sayısı	Transformer	winvoker	10
		Beyazperde	4
	Hibrit	winvoker	1
		Beyazperde	9
Dikkat katmanı genişliği	Transformer	winvoker	183
		Beyazperde	29
	Hibrit	winvoker	16
		Beyazperde	202



**Tablo 5.** Ön işlem uygulanmış veri setleri ile eğitilen modellerin performans skorları

Model Adı	Veri Seti	Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1-skor (%)
CNN	winvoker	94,42	<b>92,75</b>	89,58	90,99
	Beyazperde	<b>89,08</b>	88,82	89,42	<b>89,12</b>
Transformer	winvoker	93,36	92,65	86,84	89,19
	Beyazperde	86,63	82,71	<b>90,09</b>	86,24
Hibrit	winvoker	<b>94,64</b>	92,63	<b>90,43</b>	<b>91,44</b>
	Beyazperde	87,92	<b>90,73</b>	84,47	87,49

**Şekil 2.** Winvoker ve Beyazperde veri setleri ile eğitilen modellerde her bir sınıf baz alınarak çizilmiş kesinlik vs. duyarlılık eğrisi

Şekil 2 ile verilen eğriler incelendiğinde, modeller arasındaki fark, başarı performans metriklerine benzer şekilde sınıf bazında kesinlik vs. duyarlılık eğrilerinde de Beyazperde veri seti için belirgindir. Winvoker veri seti için ise modeller arasında kesinlik vs. duyarlılık eğri farkı ayırt edilemeyecek kadar yakın olmaktadır. Özellikle nötr ve olumlu sınıf için bu farkların çok daha az olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra winvoker veri seti ile eğitilmiş model eğrilerinin, Beyazperde veri seti ile eğitilmiş model eğrilerine göre daha düzgün, yani ideal duruma daha yakın olduğu görülmektedir. Veri setleri arasında gözlemlenen bu farklılıkların örnek sayısı ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülmektedir.

#### 4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada duygu analizi için özgün derin öğrenme modelleri geliştirilerek modeller, winvoker ve Beyazperde olmak üzere iki farklı veri seti kullanılarak analiz edilmiştir. Modellerin hiper-parametreleri Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Veri setlerine etkisiz kelime temizleme, noktalama temizleme, metin normalleştirme ve yaygın olmayan kelimelerin elenmesi ön işlemleri uygulanarak temiz veri setleri elde edilmiş ve analizler tekrar edilmiştir. Bu kapsamda üç farklı derin öğrenme modeli için iki veri setinde de hem ön işlem uygulanmış hem de uygulanmış örnekler için analiz sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde winvoker veri seti ile eğitilen modellerin, Beyazperde veri seti ile eğitilen modellere göre daha iyi performans skorları elde ettiği görülmektedir. Bu durumunun en önemli sebebinin veri setindeki örnek sayısı olduğu öngörülmekte, bu bağlamda örnek sayısı arttıkça SA derin öğrenmesi modellerinin performanslarının da iyileştiği değerlendirilmektedir.

Her bir model ön işlem uygulanmış ya da uygulanmamış veri ile eğitilme duruma göre değerlendirildiğinde ise, Beyazperde veri setine ön işlem uygulanarak eğitilen modellerin performansında, ön işlem uygulamadan eğitilen modellerin performansına göre dikkate değer iyileşmeler olmaktadır. Winvoker veri setinde ise, bu farklılığın bazı durumlarda çok az olduğu, bazı durumlarda ise ön işlem uygulanmayan veri seti kullanılarak eğitilen modellerin daha yüksek performans skoru elde ettiği görülmektedir. Sınıf bazlı kesinlik vs. duyarlılık eğrisi sonuçlarına bakıldığında da iki veri seti arasındaki bu fark net bir şekilde görülmektedir. Winvoker veri seti ile eğitilen modellerin kesinlik vs. duyarlılık eğrilerinin ideal duruma daha yakın olduğu ve model eğrilerinin iç içe girdiği görülürken, Beyazperde veri seti ile eğitilen modellerin kesinlik vs. duyarlılık eğrilerinin ideal durumdan uzaklaştığı ve modeller arası farkın arttığı görülmektedir. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında çalışma kapsamında yapılan analizlerden elde edilen diğer önemli sonuç ise, veri setindeki örnek sayısının artmasıyla birlikte duygu analizinde ön işlemin performansına etkisinin azaldığı hatta bazı durumlarda ortadan kalktığı ya da olumsuz etki ettiği görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda, daha yüksek boyutlu veri setleri kullanılarak eğitilen SA modellerinin ön işleme gerek olmadan yüksek performans skorlarına ulaşacağı değerlendirilmektedir.

Yapmış olduğumuz araştırmalar doğrultusunda winvoker veri seti ile yapılmış bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır ancak Beyazperde veri seti ile yapılmış olan birkaç çalışma bulunmaktadır. Bu kapsamda önerilen model ile elde edilen sonuçlar, Yıldırım ve diğerleri tarafından önerilen LR tabanlı model (Model 1) [43], Alqaraleh tarafından önerilen Adabost tabanlı model (Model 2) [44] ve Açıklalın ve diğerleri tarafından önerilen BERT tabanlı model (Model 3) [45] ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları tablo 6'da gösterilmektedir.

**Tablo 6.** Beyazperde veri seti için önerilen modelin literatürdeki modellerde karşılaştırılması

Model Adı	Doğruluk (%)	Kesinlik (%)	Duyarlılık (%)	F1-skor (%)
Önerilen Model (CNN)	89,08	88,82	89,42	89,12
Model 1	83	78	90	84
Model 2	86,8	----	----	----
Model 3	91.34	----	----	----

Tablo 6'da yer alan sonuçlar incelendiğinde önerilen modelin Model 1 ve Model 2'den daha iyi sonuçlar elde ettiği, Model 3'ün ise önerilen modelden daha iyi sonuçlar elde ettiği görülmektedir. Model 1 ve Model 2'de kullanılan veri setleri, çalışmamızda kullanılan veri setleri ile birebir aynı iken, Model 3'te kullanılan veri seti Beyazperde veri setinin farklı bir versiyonudur. Model 3'te kullanılan versiyonda, önerilen modelde kullanılan versiyona göre daha fazla örnek bulunmaktadır. Bu bağlamda Model 3'te daha iyi sonuç elde edilmesinin bir nedeninin ise örnek sayısındaki bu artışın olduğu düşünülmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma Detay Danışmanlık Bilgisayar Hizmetleri Sanayi ve Dış Ticaret Anonim Şirketi Ar-Ge merkezinde yapılan çalışmaların bir çıktısıdır. Destekleri için teşekkür ediyoruz. Bu makalede bildirilen deneyler Tübitak Ulakbim, Yüksek Performans ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynakları) gerçekleştirilmiştir. Y.G., fikir sahibidir, makale yazımında görev almıştır ve derin öğrenme analizleri gerçekleştirmiştir, B. A. Veri seti toplama ve ön işlem süreçlerini gerçekleştirmiştir, H. A. Makale yazımında görev almıştır, sonuçları yorumlamıştır ve derin öğrenme modeli geliştirme süreçlerinde yer almıştır.

## Kaynaklar

- [1] Hovy EH. “What are Sentiment, Affect, and Emotion? Applying the Methodology of Michael Zock to Sentiment Analysis”, *Language Production, Cognition, and the Lexicon*, 2015, 13-24.
- [2] Sánchez-Rada JF, Iglesias CA. “Social context in sentiment analysis: Formal definition, overview of current trends and framework for comparison”, *Information Fusion*, 2019, 52, 344-356.
- [3] Wankhade M, Rao ACS, Kulkarni C. “A survey on sentiment analysis methods, applications, and challenges”, *Artif Intell Review*, 2022, 55(7), 5731-5780.
- [4] Singh T, Kumari M. “Role of Text Pre-processing in Twitter Sentiment Analysis”, *Procedia Computer Science*, 2016, 89, 549-554.
- [5] Adali E, Adamov AZ. “Sentiment analysis for agglutinative languages”, *IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, 2016, Bakü, Azerbaycan, 1-3.
- [6] Yıldırım E, Çetin FS, Eryiğit G, Temel T. “The Impact of NLP on Turkish Sentiment Analysis”, *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 2014, 7(1).
- [7] Singh J, Singh G, Singh R. “Optimization of sentiment analysis using machine learning classifiers”, *Human-centric Computing and information Sciences*, 2017, 7(1), 1-12.
- [8] Jagdale RS, Shirsat VS, Deshmukh SN. “Sentiment Analysis on Product Reviews Using Machine Learning Techniques”, *Cognitive Informatics and Soft Computing*, 2019, 639-647.
- [9] Jain AP, Dandannavar P. “Application of machine learning techniques to sentiment analysis”, *2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology*, 2016, Karnataka, Hindistan, 628-632.
- [10] Gupta B, Negi M, Vishwakarma K, Rawat G, Badhani P. “Study of Twitter Sentiment Analysis using Machine Learning Algorithms on Python”, *International Journal of Computer Applications*, 2017, 165, 29-34.
- [11] Shamantha RB, Shetty SM, Rai P. “Sentiment Analysis Using Machine Learning Classifiers: Evaluation of Performance”, *IEEE 4th International Conference on Computer and Communication Systems*, 2019, Singapore, 21-25.
- [12] Naresh A, Venkata Krishna P. “An efficient approach for sentiment analysis using machine learning algorithm”, *Evolutionary intelligence*, 2021, 14(2), 725-731.
- [13] Araque O, Corcuera-Platas I, Sánchez-Rada JF, Iglesias CA. “Enhancing deep learning sentiment analysis with ensemble techniques in social applications”, *Expert Systems with Applications*, 2017, 77, 236-246.
- [14] Jianqiang Z, Xiaolin G, Xuejun Z. “Deep Convolution Neural Networks for Twitter Sentiment Analysis”, *IEEE Access*, 2018, 6, 23253-23260.
- [15] Xu G, Meng Y, Qiu X, Yu Z, Wu X. “Sentiment Analysis of Comment Texts Based on BiLSTM”, *IEEE Access*, 2019, 7, 51522-51532.
- [16] Zhao W vd. “Weakly-Supervised Deep Embedding for Product Review Sentiment Analysis”, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2018, 30(1), 185-197.
- [17] Basiri ME, Nemati S, Abdar M, Cambria E, Acharya UR. “ABCDM: An Attention-based Bidirectional CNN-RNN Deep Model for sentiment analysis”, *Future Generation Computer Systems*, 2021, 115, 279-294.
- [18] Mishev K, Gjorgjevikj A, Vodenska I, Chitkushev LT, Trajanov D. “Evaluation of Sentiment Analysis in Finance: From Lexicons to Transformers”, *IEEE Access*, 2020, 8, 31662-31682.
- [19] Naseem U, Razzak I, Musial K, Imran M. “Transformer based Deep Intelligent Contextual Embedding for Twitter sentiment analysis”, *Future Generation Computer Systems*, 2020, 113, 58-69.
- [20] Zhang T, Gong X, Chen CLP. “BMT-Net: Broad Multitask Transformer Network for Sentiment Analysis”, *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(7), 6232-6243.
- [21] Myagmar B, Li J, Kimura S. “Cross-Domain Sentiment Classification With Bidirectional Contextualized Transformer Language Models”, *IEEE Access*, 2019, 7, 163219-163230.
- [22] Potamias RA, Siolas G, Stafylopatis AG. “A transformer-based approach to irony and sarcasm detection”, *Neural Computing and Applications*, 2020, 32(23), 17309-17320.
- [23] Murfi H, Syamsyuriani, Gowandi T, Ardaneswari G, Nurrohmah S. “BERT-based combination of convolutional and recurrent neural network for indonesian sentiment analysis”, *Applied Soft Computing*, 2024, 151, 111112.
- [24] Liu Z, Zhou B, Chu D, Sun Y, Meng L. “Modality translation-based multimodal sentiment analysis under uncertain missing modalities”, *Information Fusion*, 2024, 101, 101973.
- [25] Dehkharghani R, Saygin Y, Yanikoglu B, Oflazer K. “SentiTurkNet: a Turkish polarity lexicon for sentiment analysis”, *Lang Resources & Evaluation*, 2016, 50(3), 667-685.

- [26] Salur MU, Aydın İ. “Türkçe Tweetler için Derin Özellik Çıkarımı Tabanlı Yeni Bir Duygu Sınıflandırma Modeli”, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2022, 34(1).
- [27] Ayvaz S, Yıldırım S, Salman YB. “Türkçe Duygu Kütüphanesi Geliştirme: Sosyal Medya Verileriyle Duygu Analizi Çalışması”, European Journal of Science and Technology, 2019, 16, 51-60.
- [28] Çetin FS, Eryiğit G. “Türkçe Hedef Tabanlı Duygu Analizi İçin Alt Görevlerin İncelenmesi – Hedef Terim, Hedef Kategori ve Duygu Sınıfı Belirleme”, Bilişim Teknolojileri Dergisi, 2018, 11(1), 43-56.
- [29] Onan A. “Evrimsel Sinir Ağı Mimarilerine Dayalı Türkçe Duygu Analizi”, European Journal of Science and Technology, 2020, 374-380.
- [30] Tuzcu S. “Çevrimiçi Kullanıcı Yorumlarının Duygu Analizi ile Sınıflandırılması”, Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi, 2020, 1(2).
- [31] “winvoker/turkish-sentiment-analysis-dataset · Datasets at Hugging Face”, 23 Ocak 2024, <https://huggingface.co/datasets/winvoker/turkish-sentiment-analysis-dataset>.
- [32] “Turkish Sentiment Analysis Data - beyazperde.com”, 23 Ocak 2024, <https://www.kaggle.com/datasets/ozcan15/turkish-sentiment-analysis-data-beyazperdecom>.
- [33] “Multimedia Information Retrieval Laboratory - HUBBM”, 21 Mart 2024, <http://humirapps.cs.hacettepe.edu.tr/tsad.aspx>.
- [34] “string — Common string operations”, Python documentation, 24 Ocak 2024, <https://docs.python.org/3/library/string.html>.
- [35] “NLTK :: Natural Language Toolkit”, 24 Ocak 2024, <https://www.nltk.org/>.
- [36] “zemberek-python: Python port of open source text processing library for Turkish, zemberek-nlp”, 24 Ocak 2024, <https://www.lodoss.com.tr/>.
- [37] “Keras: Deep Learning for humans”, 24 Ocak 2024, <https://keras.io/>.
- [38] Jones DR. “A Taxonomy of Global Optimization Methods Based on Response Surfaces”, Journal of Global Optimization, 2011, 21(4), 345-383.
- [39] Wu J, Chen XY, Zhang H, Xiong LD, Lei H, Deng SH. “Hyperparameter Optimization for Machine Learning Models Based on Bayesian Optimization”, Journal of Electronic Science and Technology, 2019, 17(1), 26-40.
- [40] Görmez Y, Aydın Z. “IGPRED-MultiTask: A Deep Learning Model to Predict Protein Secondary Structure, Torsion Angles and Solvent Accessibility”, IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics, 2023, 20(2), 1104-1113.
- [41] “scikit-optimize: sequential model-based optimization in Python — scikit-optimize 0.8.1 documentation”, 25 Ocak 2024, <https://scikit-optimize.github.io/stable/>.
- [42] “Metrics and scoring: quantifying the quality of predictions”, scikit-learn, 21 Mart 2024, [https://scikit-learn/stable/modules/model\\_evaluation.html](https://scikit-learn/stable/modules/model_evaluation.html).
- [43] Yıldırım M, Okay FY, Özdemir S. “Sentiment Analysis for Turkish Unstructured Data by Machine Translation”, IEEE International Conference on Big Data (Big Data), 2020, Atlanta, GA, USA, 4811-4817.
- [44] Alqaraleh S. “Turkish Sentiment Analysis System via Ensemble Learning”, European Journal of Science and Technology, 2020, 4(3), 122-129.
- [45] Acikalin UU, Bardak B, Kutlu M. “Turkish Sentiment Analysis Using BERT”, 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2020, Gaziantep, Türkiye, 1-4.





## 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.