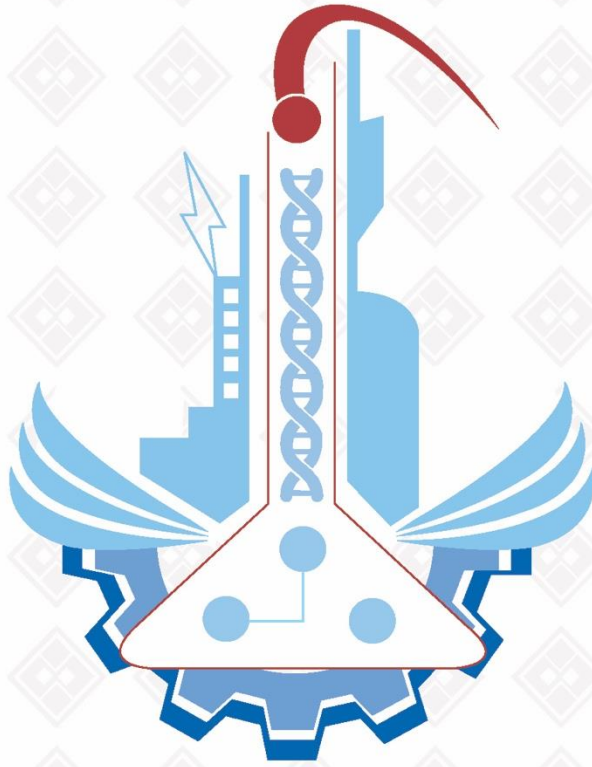


ISSN: 1308-9072

Cilt: 33 / Sayı: 1 / Yıl: 2021

# 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:33, Sayı:1, Yıl: 2021**  
**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)

**Baskı:** Fırat Üniversitesi Matbaası

**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**

**Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ**  
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Baş Editör**

**Doç. Dr. Fatih ÖZKAYNAK**  
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

**Editör**

**Doç. Dr. Emrah YILMAZ**  
Fırat Üniversitesi Enstitüsü Müdür Yrd.

**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)**  
**33-1, 2021**

**İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

1. **K-Means Kümeleme Yöntemi ile Konutlarda Kullanılan Elektrikli Cihazların Güç Tüketimi ve Harmonik Bileşenlerinden Karakter Analizi**  
*Characteristics of Power Consumption and Harmonic Components of Electrical Appliances Used in Residences with K-Means Clustering Method*  
**Mustafa Şen YILDIZ, Oktay ARIKAN, Ayşe Kübra ERENOĞLU, Bedri KEKEZOĞLU**..... **1-9**
2. **Bingöl Düzağaç Kavşağının Rotor Tipi Turbo Dönel Kavşak Olarak Düzenlemesi Durumu için Kapasite Hesaplarının Ön Çalışması**  
*Preliminary Study of Capacity Calculations for Regulation as Rotor Type Turbo Roundabout Status of Bingol Duzagac Junction*  
**İhsan GÜZEL** ..... **11-25**
3. **TOPSIS ve MAUT Yöntemleri ile İçmesuyu Dağıtım Sistemlerinde Rehabilitasyon Önceliğinin Belirlenmesi**  
*Identification of Rehabilitation Priority in Water Distribution Systems by TOPSIS and MAUT Methods*  
**Şeymanur GÜL, Mahmut FIRAT**..... **27-38**
4. **Genetik Algoritma Yöntemiyle Dairesel Cepli Hidrostatik Kaymalı Yatakların Optimizasyonu**  
*Optimization of Circular Pocket Hydrostatic Sliding Bearings by Genetic Algorithm*  
**Fazıl CANBULUT, Hakan Burçin ERDOĞUŞ** ..... **39-48**
5. **Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi**  
*Parametric Investigation of Cooling of Cylindrical Lithium Ion Batteries Used in Electric Vehicles*  
**Ali CELEN, Muhammet Yasin KABA**..... **49-61**
6. **Mekanik Olarak Aktive Edilmiş Kırmızı Çamurdan Değerli Metallerin Geri Kazanılması**  
*Recovery of Precious Metals from Mechanically Activated Red Mud*  
**M. Deniz TURAN** ..... **63-69**
7. **Kuantum Uyarlamalı Genetik Algoritmalar için Çözüm Kalitesini Artıracak Yeni Bir Yaklaşım**  
*A New Approach to Improve Solution Quality for Quantum-inspired Genetic Algorithms*  
**Hasan YETİŞ, Mehmet KARAKÖSE** ..... **71-79**
8. **Doğal Asfalt ve SBS Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Karşılaştırılması**  
*Comparison of Bituminous Binders Modified by Natural Asphalt and SBS*  
**Yunus ERKUŞ, Baha Vural KÖK, Mehmet YILMAZ**..... **81-90**
9. **Chlorella vulgaris Mikroalgi Kullanılarak Biyofotovoltaik Hücrede Güç Yoğunluğunun Araştırılması**  
*Investigation of Power Density in Biophotovoltaic Cell by Using Chlorella vulgaris Microalgae*  
**Merve BAKIR, Ergin TAŞKAN** ..... **91-99**
10. **Tek Kristal Formdaki FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> Süperiletken Sistemine In (% 5' e kadar) Katkısının Yapısal ve Elektriksel İletim Özelliklerine Etkisi**  
*Effect of In (up to 5%) addition on Electrical Transport Properties of FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> Superconductor System in Single Crystal Form*  
**Kübra YAKINCI** ..... **101-111**

<b>11. Sis Bilişim: Güvenlik Boyutları ve Güvenlik Analizi</b> <i>Fog Computing: Security Dimensions and Security Analysis</i> <b>Fatih TOPALOĞLU</b> .....	<b>113-123</b>
<b>12. Köpeklerdeki Uzun Kemiklerin Evrimsel Sinir Ağları Kullanılarak Sınıflandırılması</b> <i>Classification of the Long Bones in Dogs Using Convolutional Neural Network</i> <b>Gölnur Begüm ERGÜN, Selda GÜNEY, Tahsin Gürkan ERGÜN</b> .....	<b>125-132</b>
<b>13. Sabit Zaman Gecikmeli Tek Serbestlik Dereceli Bir Haptik-Teleoperasyon Sisteminin Kontrolü</b> <i>Control of a Single Degree of Freedom Haptic-Teleoperation System with Constant Time Delay</i> <b>Tayfun ABUT, Servet SOYGÜDER</b> .....	<b>133-140</b>
<b>14. İnsan-İHA Etkileşimi İçin Giyilebilir Eldiven Hareketlerinin Sınıflandırılması ve Analizi</b> <i>Classification and Analysis of Wearable Glove Movements for Human-UAV Interaction</i> <b>Taha MÜEZZİNOĞLU, Mehmet KARAKÖSE</b> .....	<b>141-150</b>
<b>15. Ağır Metal Gideriminde Grafen Uygulamaları: Adsorpsiyon Teknolojisi</b> <i>Graphene Applications in Heavy Metal Removal: Adsorption Technology</i> <b>Özgecan MADENLİ, Ece Ümmü DEVECİ, Çağdaş GÖNEN</b> .....	<b>151-159</b>
<b>16. St-37 Malzemesinin Lazer ile Kesme İşleminde Seçilen Parametrelerin Etkisinin Deneysel ve İstatiksel Olarak İncelenmesi</b> <i>Experimental and Statistical Investigation of the Effect of the Parameters Selected in Cutting Process with Laser St-37 Material</i> <b>Rümeysa IŞIK, Barış ÖZLÜ, Halil DEMİR</b> .....	<b>161-171</b>
<b>17. Linyit Kömürün Kurutulması için Karbonik Film Teknolojili Yeni Bir Kurutucu Tasarımı</b> <i>Design of A New Dryer With Carbonic Film Technology For Drying Lignite Coal</i> <b>Hasan HACİFAZLIOĞLU, Buse BOLAT</b> .....	<b>173-183</b>
<b>18. Pomza-Bazlı Adsorbanların Sentetik Su Numunelerinden Lityum Adsorpsiyonu Verimliliğinin Karşılaştırılması</b> <i>Comparision of Pumice-Based Adsorbents for Lithium Adsorption in Sythetic Aqueous</i> <b>Deniz İzlen ÇİFÇİ, Süreyya MERİÇ</b> .....	<b>185-192</b>
<b>19. Çörek Otu Posasının Aktif Karbon Üretiminde Değerlendirilmesi</b> <i>Valorization of Black Cumin Pulp in the Activated Carbon Production</i> <b>Sibel ASLAN</b> .....	<b>193-201</b>
<b>20. Kil Blok Tuğlalı Bir Yığma Binanın Duvar Kesme Dayanımının N-Schmidt Çekici ile Belirlenmesi</b> <i>Determination Of Sliding Shear Strength Of A Clay Block Brick Masonary Building Using N-Schmidt Hammer</i> <b>Orhan DOĞAN</b> .....	<b>203-210</b>
<b>21. CuZn Elektrotundan Zn'nin Uzaklaştırılmasının Hidrojen Çıkış Davranışı Üzerine Etkisi</b> <i>The Effect of Leaching of Zn from CuZn on Hydrogen Evolution Behavior</i> <b>Serap TOPRAK DÖŞLÜ</b> .....	<b>211-221</b>
<b>22. Sürdürülebilir Ulaşım İçin Güneş Enerjili Teknelerin Kullanılması ve Çevresel Etkileri</b> <i>Solar Boats for Sustainable Transportation and Their Environmental Impacts</i> <b>Şafak HENGİRMEN TERCAN</b> .....	<b>223-232</b>



<b>23. İkili Sözel Gösterim Tabanlı Bilişsel Haritanın Tedarik Zinciri Konfigürasyonunda Kullanımı</b> <i>2-Tuple Fuzzy Linguistic Representation Model Based Cognitive Map for Supply Chain Configuration</i> Mehtap DURSUN, Nazlı GÖKER.....	233-241
<b>24. Farklı Parametreler Işığında Fiber/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Mukavemet Özelliklerinin Deneysel Olarak Değerlendirilmesi</b> <i>Experimental Evaluation of Strength Properties of Fiber/Epoxy Laminated Composites in the Light of Different Parameters</i> Ercüment Uğur Yüncüoğlu, Serdar Turgut İnce .....	243-249
<b>25. Evsel Arıtma Çamurunun Kapalı Solar Kurutulmasında Mevsim Faktörünün Değerlendirilmesi</b> <i>Evaluation of Season Factor in Closed Solar Drying of Domestic Treatment Sludge</i> Emine SAYILGAN, Hayriye Işıl ÜNLÜ.....	251-261
<b>26. Adıyaman İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi Üzerine Bir Değerlendirme</b> <i>An Evaluation on Determination of Renewable Energy Potential of Adıyaman Province</i> Mustafa ASLAN, Tuba ULUM, Harun TÜRKMENLER.....	263-274
<b>27. Fe elementindeki <math>\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta</math> Katı-Katı Faz Geçişlerinin Moleküler Dinamik Benzetimi ile İncelenmesi</b> <i>The Investigation with Molecular Dynamic Simulation of <math>\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta</math> Solid-Solid Phase Transformation in Fe</i> Sefa KAZANÇ, Canan Aksu CANBAY.....	275-282
<b>28. Doğal Renkli Pamuk: Genel Özellikleri ve Tekstil Alanında Yapılan Önceki Çalışmalar</b> <i>Natural Colored Cotton: General Properties and Previous Studies in Textile Field</i> Muhammed Fatih YÜKSEL, Gürkan ŞENEL, Rıza ATAV.....	283-293
<b>29. Benzetimli Tavlama Algoritması İle Eksik Veri Tamamlama</b> <i>Completion of Missing Data with the Simulated Annealing Algorithm</i> Serkan METİN .....	295-301
<b>30. Soğuk Şartlar Altındaki Bir Boruda MHD Nanoakışkanın Zorlanmış Taşınım ile Isı Transferi</b> <i>Heat Transfer with Forced Convection of MHD Nanofluid in a Pipe Under Cold Conditions</i> Murat ERDEM, Yasin VAROL, Müjdat FIRAT.....	303-313
<b>31. Döndürerek Kaplama Yöntemi ile Hazırlanan Ca katkılı TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Optik ve Morfolojik Özellikleri</b> <i>Optical and Morphological Properties of Ca Doped TiO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Spin Coating Method</i> Uğur ÇALIGÜLÜ, Ayhan ORHAN, Zafer BARLAS, Nida DARCAN.....	315-327
<b>32. Çapraz Bağlı Kitosan/Selüloz/Grafen Kompozitinin Şişme Davranışlarının İncelenmesi</b> <i>Investigation of Swelling Behavior of Cross-Linked Chitosan / Cellulose / Graphene Composite</i> Betül ÇİÇEK ÖZKAN .....	329-337
<b>33. İki Farklı Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) Plastik Atığın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı</b> <i>The Use of Two Different Low Density Polyethylene (LDPE) Plastic Wastes in Bitumen Modification</i> İremgül Bektaş, Erkut YALÇIN, Özge Erdoğan YAMAÇ, Mehmet YILMAZ.....	339-346

34. **Tel Erozyon Yöntemiyle İşlenmiş Ti 6Al 4V Alaşımının Yüzey Kalitesinin Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemiyle İyileştirilmesi**  
*Improvement of Surface Quality of W-EDMed Ti 6Al 4V Alloy by Magnetic Abrasive Finishing*  
**Mahmut ÇELİK, Hakan GÜRÜN, Ulaş ÇAYDAŞ.....** 347-357
35. **F2 Bölgesinde Sönüm Katsayılarının Karesinin (F2) Büyüklüğünün Düşük Enlemlerdeki Davranışının İncelenmesi**  
*Investigation of the Behavior of the Magnitude of the Square of the Absorbtion Coefficients in the F2 Region at Low Latitudes*  
**Kadri KURT, Vahdettin KOÇ.....** 359-365

M. B. D.



## K-Means Kümeleme Yöntemi ile Konutlarda Kullanılan Elektrikli Cihazların Güç Tüketimi ve Harmonik Bileşenlerinden Karakter Analizi

Mustafa Şen YILDIZ<sup>1\*</sup>, Oktay ARIKAN<sup>2</sup>, Ayşe Kübra ERENOĞLU<sup>3</sup>, Bedri KEKEZOĞLU<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, Türkiye

<sup>2,3,4</sup> Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

\*<sup>1</sup> mustafasenyildiz@klu.edu.tr, <sup>2</sup> oarikan@yildiz.edu.tr, <sup>3</sup> erenayse@yildiz.edu.tr, <sup>4</sup> bkekez@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 03/02/2020;

Kabul/Accepted: 21/10/2020)

**Öz:** Sanayileşmenin artması ve teknolojik gelişmeler, elektrik enerjisine olan ihtiyacı ve enerji kalitesine olan etkiyi artırmaktadır. Bu durum, elektriksel yüklerin izlenmesi ve kontrol edilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Konutlarda kullanılan elektrikli cihazların ölçüm ve denetimi amacıyla farklı akıllı ölçüm uygulamaları ve makine öğrenmesi algoritmaları denenmektedir. Bu çalışmada, evsel cihazların, temel güç tüketim parametreleri ve ürettikleri harmonik bileşenler dikkate alınarak, her bir cihazın güç tüketim karakterleri incelenmiştir. Ölçümler, K-Means kümeleme algoritması ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, yeterli sayıda öznelik dikkate alınması durumunda her bir cihazın güç tüketim karakterlerine ulaşılabileceği gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Yük izleme, Harmonikler, Kümeleme, K-Means.

### Characteristics of Power Consumption and Harmonic Components of Electrical Appliances Used in Residences with K-Means Clustering Method

**Abstract:** Industrialization and technological developments increase the need for electrical energy and the impact on energy quality. Therefore, it is needed to monitoring and controlling of electrical loads. Different intelligent measurement applications and machine learning algorithms are tried for measurement and control of electrical devices used in residences. In this study, the power consumption characteristic of each residential device are measured by considering the basic power consumption parameters and harmonic components. Measurements were analyzed by K-Means clustering algorithm. As a result of the analysis, it is observed that the power consumption characteristics of each device can be achieved if sufficient number of features are taken into account.

**Key words:** Load monitoring, Harmonics, clustering, K-Means.

#### 1. Giriş

Elektrik enerjisinde kalite, akım ve gerilim dalga şekillerinin sürekli, dengeli ve saf sinüs olmasına, gerilimin efektif değeri ile frekansın sabit olmasına ve güç faktörünün 1'e yakın olmasına bağlıdır. Enerji kalitesi problemleri ise, yarı iletken malzemelerin kullanımına, güç sistemi üzerinde bulunan ekipman ve yüklere, meteorolojik unsurlara, vb. durumlara bağlı olarak; gerilim dengesizliği, kesinti, kırpışma (flicker), gürültü, geçici durumlar, harmonik bileşenler olarak sıralanabilir. Bu problemlerden biri olan harmonik bileşenler, dalga şekli bozulmasına, akım ve gerilimin efektif değerlerinin artmasına, arıza akımlarının yükselmesine, cihazlarda aşırı zorlanmalara ve kontrol-kumanda devrelerinde hatalı açmalara sebep olmaları nedeniyle en önemli kalite parametrelerindedir [1].

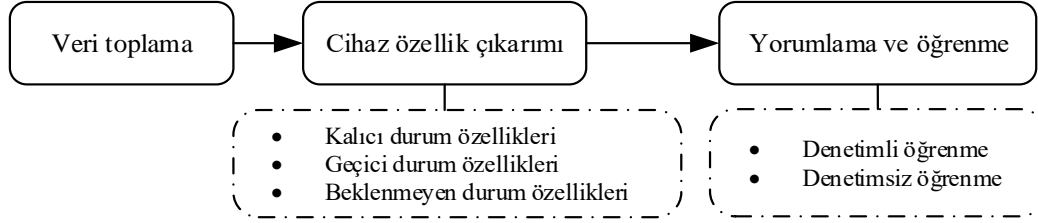
Kalite problemleri genel olarak meydana geldiği saha açısından iki gruba ayrılmaktadır. Birinci grup, iletim ve dağıtım sistemlerinden kaynaklanan gerilim çöküntülerini ve enerji kesintilerini içermektedir. İkinci grup ise evsel yüklerin büyük çoğunluğunu oluşturduğu müşteri tarafında meydana gelen dalga şekli bozulmalarını içermektedir.

Son yıllarda evsel yüklerin, genel şebeke içerisindeki ağırlığı da hızla artmaktadır. Birleşik Krallık'ta konut elektriğinin kullanımı genel şebeke içerisinde %30 seviyelerine ulaşmış durumdadır [2]. Bu oranın Amerika Birleşik Devletleri'nde ise yaklaşık olarak %23 civarında olduğu, 2030 yılında ise %25'e ulaşacağı tahmin edilmektedir [3]. Bu yüklerde yarı iletken elemanların kullanımının artmasına da paralel olarak harmonik etkinin de artacağı açıktır. Bu durum dikkate alındığında, konutlarda tüketilen enerjinin denetimi ve yönetimi büyük bir

\* Sorumlu yazar: [mustafasenyildiz@klu.edu.tr](mailto:mustafasenyildiz@klu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4176-9353, <sup>2</sup> 0000-0002-3304-3766, <sup>3</sup> 0000-0002-9578-6194, <sup>4</sup> 0000-0002-1202-913X

gerekliliktir. Buna cevap verebilmek için literatürde, cihaz yükü izleme (Appliance Load Monitoring-ALM) konusunda, akıllı ölçüm cihazları ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmektedir [3],[4],[18]. ALM'nin amacı akıllı ölçüm cihazları kullanılarak evsel yüklerin anlık güç analizini yapmaktır. Akıllı sayaçların yaygınlaşmasına ve kullanıcı tüketimine ilişkin somut bilgilerin elde edilmesine bağlı olarak, tüketicinin tüketim şekli hakkındaki bilgiler, müşteri ve kamu işletmeleri için kalite iyileştirme, enerji verimliliği, özel tarifeler oluşturma, bir evin yaşam biçimini anlama ve talep cevabını düzenleme gibi pek çok konuda bilgi sağlamaktadır [6], [7].

ALM genel olarak, müdahaleci yük izleme (Intrusive Load Management-ILM) ve müdahaleci olmayan yük izleme (Non-Intrusive Load Management-NILM) olarak iki yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. ILM yaklaşımında her elektronik cihazın bir sensör yardımıyla ölçümleri alınmakta ve detaylı şekilde analizi yapılmaktadır. Ancak, bu yöntem her ne kadar daha doğru sonuç veriyor olsa da yüksek maliyeti sebebiyle ticarileşme olasılığı azalmaktadır [5]. Diğer bir yaklaşım olan NILM ise her ev için sadece bir adet akıllı sayaç kullanılarak, evin çektiği toplam aktif güç, reaktif güç, güç faktörü, harmonik bileşenler vb. ölçümleri toplanmakta ve analizini yaparak evde hangi cihazların çalıştığını tahmin etmektedir [5], [7], [8], [19], [20]. Şekil 1'de bu sistemin genel akış diyagramı gösterilmektedir. Tahmin süreci, evsel yüklerin kendilerine özgü güç tüketimlerinin, toplam güçten ayrıştırılması işlemidir. Bu işlem için, neural networks [9], K-Means [10], hidden markov model [11], partial filter [12], vb. farklı makine öğrenmesi algoritmaları denenmektedir [13].



Şekil 1. NILM sisteminin genel akışı [5].

Tahmin sürecinde, birbirine yakın tüketim yapan cihazlar ve geçici durumlar problem oluşturmaktadır. Problemleri en aza indirmek için uygulanacak algoritmanın test verileri her bir cihazı kapsayacak şekilde ve bütün çalışma modlarını içerecek şekilde oluşturulmalıdır. Cihazların çalışma modlarına göre farklı güç değerleri çekecekleri dikkate alındığında bütün modlara ait ölçüm değerlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra geçici ve beklenmeyen durumlar da dikkate alındığında tek bir evsel yük için bile onlarca farklı durum ölçümü gerekmektedir. Bu sebeple kümeleme yaparken denetimli öğrenme metodları kullanılarak her bir cihazın farklı modlarının ölçümlerinin alınması yerine denetimsiz öğrenme algoritmalarını kullanarak belirli aralıklar dâhilinde ve kabul edilebilir hata oranlarıyla kümeleme yapılabilir. Belirlenecek aralıkların her bir cihaz için özgün karakter oluşturması gerekmektedir. Aksi takdirde cihaz tahminlerinde yanılgılar olacaktır. Bu problemleri aşmak için cihazların ve çalışma modlarının öznitelikleri olan temel güç parametrelerine (S, P, Q, ...) ek olarak harmonik bileşenler gibi ekipmana özgü parametreler de tahmin sürecine dahil edilmelidir.

Bu çalışmada, evsel cihazların güç tüketimindeki kendine özgü imzaları araştırılmıştır. Araştırma için Yıldız Teknik Üniversitesi (YTÜ) Elektrik Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan akıllı ev laboratuvarında evsel cihazların detaylı ölçümleri yapılarak, gerçek ölçümler üzerinden kümeleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Her cihaz için özellik sayısı arttıkça cihazlar arasında belirgin farklar oluştuğu gözlemlenmiştir.

Makalenin 2. bölümünde evsel yük ölçüm yöntemi, metodolojisi ve harmonik bileşenlerden bahsedilmiştir, 3. Bölümde, kümeleme yöntemi ve K-Means algoritması anlatılmıştır. 4. Bölümde veri analiz sonuçları yorumlanmıştır. Son bölümde ise sonuç ve öneriler aktarılmıştır.

## 2. Metodoloji

Bu bölümde, konutlarda kullanılan elektrikli cihazların karakter analizi için kullanılan veriler ile ilgili genel bilgiler verilmektedir. Analiz için ihtiyaç duyulan temel parametrelerin (S, P, Q, ...) yanında özellikle harmonik bileşenler de dikkate alınmaktadır. Çalışmada kullanılan temel parametrelerin ölçümü ve harmonik bileşenler hakkında bilgiler alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

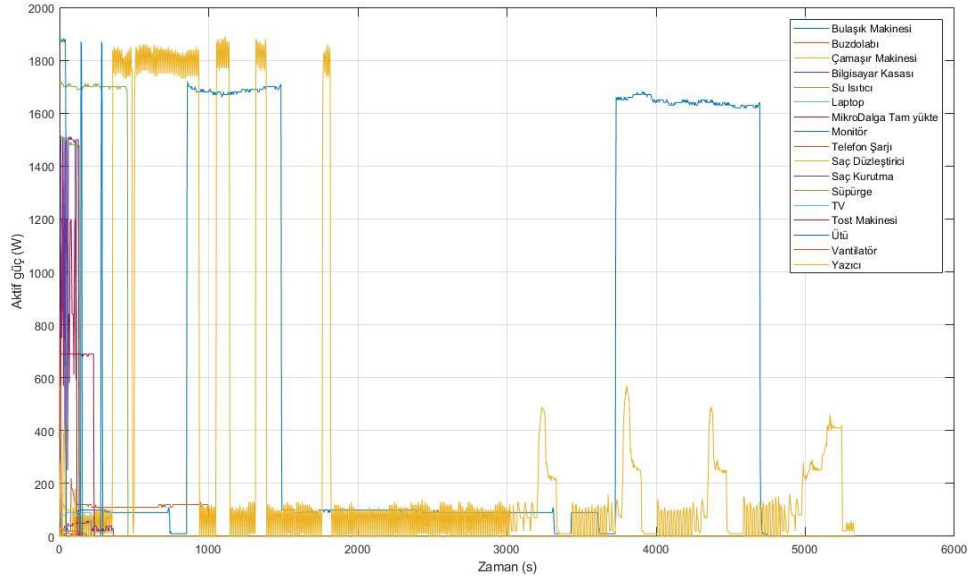
## 2.1 Ölçümler

Evsel cihazların her birinin farklı güç karakteri vardır. Bu karakterlerin özgünlüğünü incelemek için cihazların şebekeden çektikleri aktif güç, reaktif güç ve harmonik bileşen ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler Şekil 2’de gösterilen Fluke 435-II serisi 3 fazlı güç kalitesi analizörü ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Fluke 435-II.

Gerçekleştirilen çalışmada 17 adet evsel cihaz dikkate alınmıştır. Bu cihazlar Tablo 1’de sunulan etiket anma gücü değerleri ile birlikte belirtilmektedir. Ölçüm değerleri, cihazların çalışma modları göz önüne alınarak belirli zaman aralığı boyunca, her 3 saniyelik örnekleme periyodunda bir yapılmış ve ölçümlerin ortalamaları alınarak değer belirlenmiştir.



Şekil 3. Evsel cihazların çektikleri anlık güçler.

Alınan ölçümlerden elde edilen aktif güç, reaktif güç, görünür güç, güç faktörü, toplam harmonik bozulma, harmonik bileşen değerlerinin ortalamaları dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3’de cihazların ölçülen anlık aktif güç grafiği gösterilmektedir. Cihazlar içerisinde en fazla güç tüketen cihaz 1677,48W ile su ısıtıcı, en az güç tüketen cihaz ise 8,57W ile telefon şarjı olduğu gözlemlenmiştir.

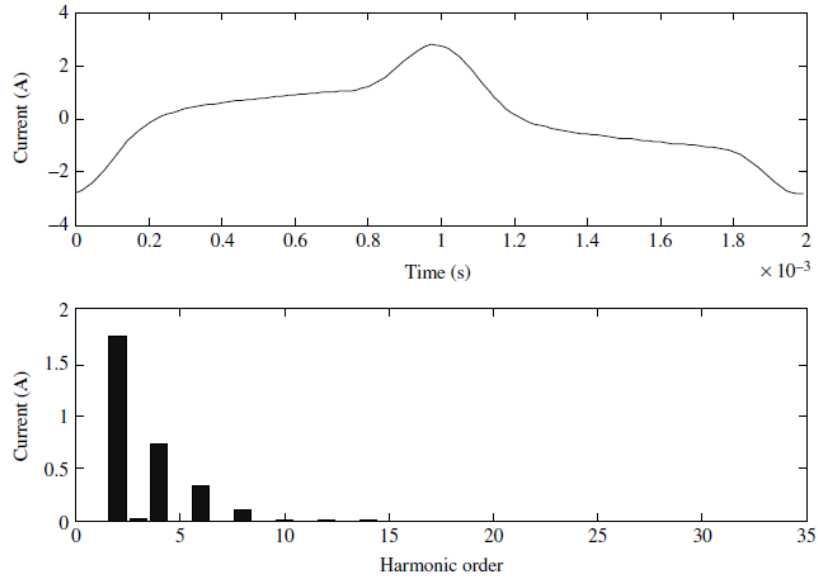
**Tablo 1.** Ölçüm yapılan cihazlar ve anma güçleri.

Cihaz	Anma Gücü (kW)	Cihaz	Anma Gücü (kW)
Buzdolabı	0.150	Saç düzleştirici	0.055
Ütü	2.4	Fırın	2.05
Tost makinesi	0.708	Bulaşık makinesi	1.7
Su ısıtıcı	2	Mikrodalga fırın	1.18
Saç kurutucu	1.536	Yazıcı	0.02
LCD-TV	0.09	Dizüstü bilgisayar	0.03
Bilgisayar kasası	0.05	Çamaşır makinesi	1.8
Bilgisayar monitörü	0.03	Elektrikli süpürge	1.9
LED Aydınlatma	0.035		

Programlı cihazlarda, örneğin çamaşır makinesinde, bir program süresi boyunca ölçüm alınmıştır. Programlı olmayan cihazlar için ise günlük kullanım tahmini yapılarak belirlenen süreler boyunca ölçümler alınmıştır.

## 2.2. Harmonikler

Harmonikler genel olarak, temel frekansın (Türkiye için 50 Hz) dışında temel frekansın tam katı frekanslardaki sinüzoidal akım veya gerilim bileşenleridir. Evsel cihazlardaki aktif devre elemanları harmonik etkiye sebep olmakta ve dalga şeklini bozmaktadır. Bu durum, güç kalitesini ve verimliliği azaltmaktadır. Ancak, cihaz karakteristiğini belirleme açısından bakıldığında, karakteristiklerin belirlenmesi açısından, harmonik etkilerin dikkate alınması önem arz etmektedir.

**Şekil 4.** Ayrık zamanlı fourier dönüşümü [17].

Harmonik bileşenlerin belirlenmesinde bütünlük bir dalgacı, alt frekanslardaki dalga bileşenlerine ayırmak için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan güç analizörü, Fast Fourier Transform (FFT) modeliyle alt bileşenleri göstermektedir. Bu matematiksel model, (1) denkleminde gösterilmektedir. Denklemdaki  $N$ , bir periyotta kaç adet eşit uzaklıkta örnekleme noktası alındığını belirtmektedir. Zaman boyutundaki bir dalganın frekans boyutunda FFT karşılığı Şekil 4'te gösterildiği şekilde modellenmektedir.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

Toplam harmonik bozulma (2) denkleminde gösterilen formülden hesaplanmakla birlikte Tablo 2’de ölçüm yapılan bütün cihazlara ait toplam harmonik bozulmalar belirtilmiştir.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

Toplam harmonik bozulmanın etkisinin yanı sıra her bir bileşen için harmonik bozulmanın etkisi de (3) denklemi ile bulunmaktadır.

$$H_I(h) = \frac{I^{(h)}}{I_1}, \quad h = \text{harmonik derecesi} \quad (3)$$

Ölçüm yapılan cihazların her biri için harmonik bozulmalar ölçülmüş ve analiz bölümünde detaylı olarak irdelenmiştir.

### 3. Kümeleme Analizi

Kümeleme algoritmaları, veri madenciliğinde kullanılan denetimsiz öğrenme yöntemlerinden biridir. Bu yöntemin hastalık tedavilerini sınıflandırma, tıbbi görüntüleme, pazar bölümlenme, örüntü tanıma, görüntü işleme, sosyal medya analizi gibi birçok farklı alanda uygulaması mevcuttur.

Kümeleme en genel anlamda, çok boyutlu nesnelerin benzerlik ölçüsü yardımıyla benzer özelliklerine göre ayırt edilmesi ve gruplandırılması işlemidir. Amaç, küme içi benzerliğin en yüksek, kümeler arası benzerliğin ise en düşük olmasını sağlamaktır. Bu işlem için n adet veri örneğinin her birinin p adet özelliği olduğunu varsayarsak, p adet boyut boyunca n adet veri durum uzay düzleminde örneklenmektedir.

Örnek veri seti  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ ,  $n * p$  boyutlu veri matrisi şeklinde de gösterilebilmektedir. Bu gösterim (4) denkleminde verilmiştir. Burada  $x_{ij}$ ,  $i$ 'nci veri için  $j$ 'nci özelliği ifade etmektedir [10].

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Yukarıda bahsedilen benzerlik ölçüsü, Manhattan ((5) eşitliğinde gösterilmektedir.), Öklid ((6) eşitliğinde gösterilmektedir.), Minkowski ((7) eşitliğinde gösterilmektedir.), vb. uzaklık ölçüm fonksiyonlarıdır [11].

$$d(x, y) = \sum_{k=1}^p |x_k - y_k| \quad (5)$$

$$d(x, y) = (\sum_{k=1}^p (x_k - y_k)^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$d(x, y) = (\sum_{k=1}^p (x_k - y_k)^\alpha)^{1/\alpha} \quad (7)$$

Örnekta bahsedilen  $p$  boyutlu  $n$  adet veri, pek çok farklı yöntemle kümelenebilir. Genel anlamda bu yöntemler hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [12].

Hiyerarşik kümelemenin, Yığınsal (Agglomerative) ve Bölücü (Divisive) olarak iki farklı varyasyonu vardır. Yığınsal yönteminde her bir veri bir küme olarak kabul edilerek yakınlıklarına göre birleştirilirler. Bölücü yöntemde ise tam tersi yönde hareket eder ve sonuçlar küme ağaçları veya dendrogramlar şeklinde görselleştirilirler.

Hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemleri ise veri setini, belirli ölçütleri minimize ederek istenilen  $k$  adet kümeye bölmektedir. Bu bölümlenmeyi yaparken yukarıda bahsedilen uzaklık fonksiyonları kullanılmaktadır [12]. Hiyerarşik olmayan kümeleme içerisinde K-Means algoritması en çok tercih edilen algoritmadır.

#### 3.1. K-Means algoritması

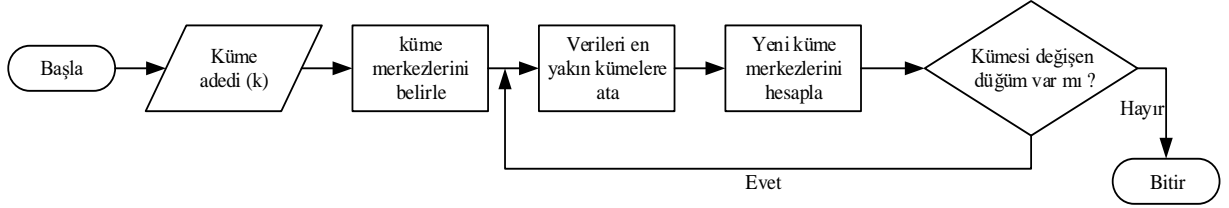
K-Means kümeleme yöntemi,  $n$  adet verinin, her örneğin kendine en yakın olduğu  $k$  tane kümeye ayrılmasını amaçlayan bir yöntemdir. Bu yöntemle, başlangıçta en iyi  $k$  adet küme bilinmese bile küme adedine müdahale



edilerek uygun küme sayısı belirlenebilmektedir. En iyi k adet küme, küme içi varyantı veya SSE fonksiyonunu en aza indirmekle bulunmaktadır. K-Means algoritmasının ana fonksiyonu eşitlik (8)'de gösterilmiştir.

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \quad (8)$$

Bu fonksiyonda belirtilen J, ana fonksiyonu;  $j=\{1,2, \dots, k\}$ , küme adedini;  $i=\{1,2, \dots, n\}$ , veri adedini;  $c_j$ , j. küme merkezini ve  $x_i$ , verinin boyutsal olarak yerini göstermektedir. Veri noktası ( $x_i$ ), p boyutlu uzaya sahiptir ve verinin sahip olduğu özellik adedine göre değişmektedir. Algoritma aşamaları genel olarak Şekil 5'de belirtilen adımlardan oluşmaktadır.



Şekil 5. K-Means algoritması akış şeması.

K-Means algoritmasının girdileri, cihazların yük profillerini ve maksimum küme sayısını içerir. Maksimum küme sayısı her zaman giriş yükü profillerinin sayısına eşittir. Maksimum küme sayısına ulaşılması durumunda, her yük profili kendi kümesine sahip olacaktır. Yük profilleri bu durumda kümelerinin merkezleridir. Algoritma her bir yinelemesinde, denklem (6) 'ya göre yük profilleri ve küme merkezleri arasındaki ortalama Öklid mesafesini hesaplar. Bu, her yük profilinin en yakın merkeze sahip kümeye atanmasını sağlar.

### 3.2. Kare Hata Toplamı

Kare hata toplamı (SSE) istatistiksel verisi, yöntemin performansını kıyaslamada önemli bir ölçüttür. Bu veri, her zaman pozitif değer almakla birlikte ideal değeri sıfıra yakın olmalıdır. Eşitlik (9)'da gösterilen denklemle hesaplanmaktadır. Bu denklemde  $x$ ,  $c_j$  kümesindeki boyutsal veriyi;  $\mu_j$  ilgili verinin atandığı boyutsal küme merkezini belirtmektedir.

$$SSE = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} (\mu_j - x)^2 \quad (9)$$

Yük profilleri ve karşılık gelen küme merkezleri arasındaki kare hata toplamı (SSE) değeri, optimum küme sayısını belirlemek için ölçüt olarak kullanılmaktadır.

Algoritma analizinden sağlıklı sonuç elde etmek için küme sayısının belirlenmesi ve kare hata toplamı (Sum of Squared Error - SSE) minimum seviyede tutulması çok önemlidir.

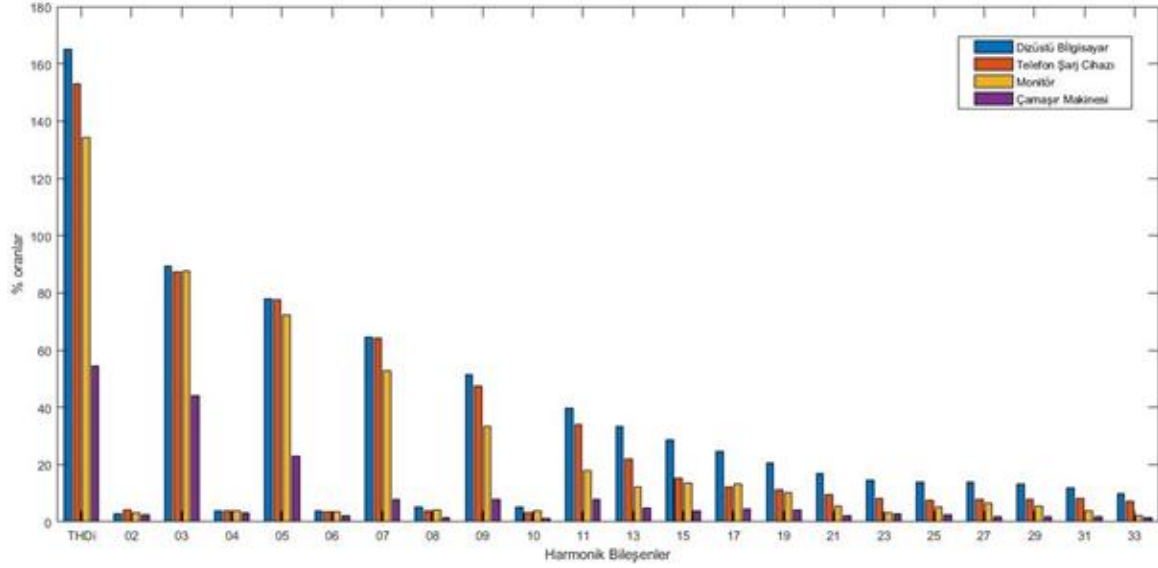
Tablo 2. Evsel cihazların ölçüm değerleri.

Cihaz	Aktif güç (W)	Reaktif güç (WAr)	THD <sub>i</sub>	Cihaz	Aktif güç (W)	Reaktif güç (WAr)	THD <sub>i</sub>
Bulaşık Makinesi	235.4	-8.01	28.59	Saç Düzleştirici	83.4	-20	23.02
Buzdolabı	117.1	44.68	19.17	Saç Kurutma	1222.6	-24.78	4.4
Çamaşır Makinesi	331.6	132.6	54.60	Süpürge	1399.1	104.3	21.38
Bilgisayar Kasası	36.9	-23.14	43.87	TV	84.08	-19.15	20.07
Su Isıtıcı	1677.48	-39.41	3.74	Tost Makinesi	674.4	-19.4	3.2
Dizüstü Bilgisayar	22.79	-10	165.2	Ütü	360.7	-17.38	15.4
Mikrodalga Fırın	916.09	-11.70	15.92	Vantilatör	19.4	29	14.4
Monitör	10	0	134.3	Yazıcı	135.6	-6.8	48.5
Telefon Şarj Cihazı	8.57	0	153.1				

#### 4. Ölçüm ve Analizler

Evsel cihazların temel elektriksel öznitelikleri (S, P, Q, ...) kullanılarak yapılan kümeleme, cihaz sayısı arttıkça ve cihazların farklı çalışma modları eklendikçe, özgün karakter çıkarımı için yeterli olmamaktadır. Ancak harmonik bileşenlerin eklenmesi daha başarılı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Analizi yapılan cihazların aktif güç, reaktif güç ve toplam harmonik akım bozulma (THB<sub>1</sub>) ölçüm değerleri Tablo 2’de gösterilmektedir. Sadece bu üç verinin kullanılması bile özgün karakter tahmini açısından belirgin farklar sunmaktadır. Ancak, gerek farklı çalışma modları, gerekse cihaz sayısının artacak olması, daha ayrıntılı analiz yapma ihtiyacı doğurmaktadır.



Şekil 6. Evsel cihazların harmonik bileşenleri.

Ölçümleri alınan 17 adet evsel cihaz, Weka programı ile K-Means algoritması kullanılarak, 9 farklı öznitelik senaryosu için gruplandırılmıştır. Bu öznitelik senaryolarında, aktif güç (P), reaktif güç (Q), görünür güç (S), güç faktörü (PF), toplam harmonik bozulma (THD),  $\cos\phi$  değerleri ve belirli harmonik bileşenler ( $H_2, H_3, H_5, H_7, H_9, H_{11}, H_{13}, H_{15}, H_{17}, H_{19}, H_{21}$ ) değişken olarak kullanılmıştır. Her senaryo için 17 adet cihaz 6’dan 17’ye kadar alt gruplara ayrılmış ve gruplandırma sonucunda hesaplanan SSE değerleri Tablo 3’de belirtilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde SSE değerlerinin, soldan sağa doğru gidildiğinde azaldığı ve yukarıdan aşağıya doğru gidildikçe ise arttığı görülmektedir. Satırlar kendi içinde incelendiğinde, 0,5 SSE değerini eşik olarak belirlenmesi durumunda, harmonik bileşenlerin dikkate alınmadığı 1. ve 2. senaryoda, 8 alt grupta, 4. Senaryoda 11 grupta, 5-8 arası senaryolarda 13 grupta ve son olarak 9. Senaryo da ise 14 grupta eşik değer altına düşüldüğü görülmektedir. Sütunlara bakıldığında ise cihazlar 15 gruba ayrılırsa (1. senaryodan 9. senaryoya doğru bakıldığında), 1. senaryoda 0,04 olan SSE değeri 9. Senaryoda 0,25’e yükselmektedir. Bu durum, öznitelikler arttığında cihazların ayrı gruplarda toplanma eğiliminde olduğunu belirtmektedir. Yani öznitelik sayısı arttıkça cihazların enerji tüketim karakterleri farklılaşmaktadır.

15. ve 16. gruplar daha detaylı incelendiğinde, aynı gruba dâhil olan cihazlar Tablo 4’te gösterilmektedir. 16. grup için bütün cihazların farklı gruplara dağıldığı; ancak 2-8 arası senaryolarda, mikrodalga fırın ile tost makinesinin aynı grupta, 1. ve 9. senaryoda ise mikrodalga fırın ile saç kurutma makinesinin aynı grupta yer aldığı görülmektedir. Bu sonuç, harmonik bileşenler öznitelik olarak dikkate alınmadığında mikrodalga fırın ile saç kurutma makinesinin enerji tüketimlerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Ancak harmonik bileşenler dikkate alınırsa mikrodalga fırın ile tost makinesinin enerji tüketim parametrelerinin birbirine yakın olmakta, bu karşın bu iki cihazın harmonik bileşen parametreleri incelendiğinde 3. ve 5. harmonik bileşenlerinde net farklar ölçüldüğü görülmektedir.

**Tablo 3.** Evsel cihazların özelliklerine göre kümeleme sonuçlarının kare hata oranları.

		Grup Sayısı												
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Öz nitelik Senaryoları	1	P, Q, S	0,6	0,19	0,14	0,13	0,12	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0
	2	P, Q, PF	0,9	0,49	0,27	0,21	0,2	0,16	0,12	0,03	0,02	0,01	0,01	0
	3	P, Q, PF, THD <sub>i</sub>	1,25	0,84	0,82	0,31	0,26	0,22	0,2	0,1	0,09	0,09	0,01	0
	4	P, Q, PF, THD <sub>i</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub>	1,68	1,26	1,24	0,93	0,53	0,49	0,47	0,26	0,17	0,14	0,03	0
	5	P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> , H <sub>5</sub> , H <sub>7</sub>	1,89	1,76	1,71	1,37	0,94	0,54	0,52	0,3	0,21	0,17	0,05	0
	6	P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> , H <sub>5</sub> , H <sub>7</sub> , H <sub>9</sub> , H <sub>11</sub>	2,2	2,07	1,8	1,41	0,98	0,57	0,54	0,3	0,23	0,18	0,05	0
	7	P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> , H <sub>5</sub> , H <sub>7</sub> , H <sub>9</sub> , H <sub>11</sub> , H <sub>13</sub> , H <sub>15</sub>	2,63	2,5	2,03	1,62	1,17	0,77	0,56	0,46	0,24	0,18	0,05	0
	8	P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> , H <sub>5</sub> , H <sub>7</sub> , H <sub>9</sub> , H <sub>11</sub> , H <sub>13</sub> , H <sub>15</sub> , H <sub>17</sub> , H <sub>19</sub> , H <sub>21</sub>	3,24	3,12	2,42	2	1,55	1,15	0,61	0,37	0,27	0,18	0,05	0
	9	P, Q, S, PF, cosφ, THD <sub>i</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> , H <sub>5</sub> , H <sub>7</sub> , H <sub>9</sub> , H <sub>11</sub> , H <sub>13</sub> , H <sub>15</sub> , H <sub>17</sub> , H <sub>19</sub> , H <sub>21</sub>	4,18	4,05	3,25	2,71	2,26	1,85	1,01	0,58	0,32	0,25	0,05	0

15. grupta ise 4-8 arası senaryolarda, mikrodalga fırın ile tost makinesinin bir grupta ve buna ek olarak buzdolabı ile vantilatörün ise başka bir grupta toplandığı, 1. ve 9. senaryoda mikrodalga fırın ile saç kurutma makinesi bir grupta buzdolabı ile vantilatör başka bir grupta toplanmaktadır. Ancak 2. senaryoda mikrodalga fırın ile tost makinesine ek olarak dizüstü bilgisayar ile monitör, 3. Senaryoda ise ek olarak bilgisayar kasası ile vantilatörün aynı grupta toplandığı görülmektedir. Buzdolabı ve vantilatörün 5. ve 7. harmonik bileşenlerinde, dizüstü bilgisayar ile monitörün 9., 11. ve 13. harmonik bileşenlerinde, bilgisayar kasası ile vantilatörün ise 2., 3. ve 5. harmonik bileşenlerinde net farklar ölçülmüştür.

**Tablo 4.** Kümeleme sonucunda aynı kümede toplanan evsel cihazlar.

		Grup Sayısı	
		16	15
Öz nitelik Senaryoları	1 (P, Q, S)	Mikrodalga fırın saç kurutma makinesi	Mikrodalga fırın / saç kurutma makinesi + Buzdolabı / Vantilatör
	2 (P, Q, PF)	Mikrodalga fırın Tost makinesi	Mikrodalga fırın / Tost makinesi + Dizüstü bilgisayar / Monitör
	3 (P, Q, PF, THD <sub>i</sub> )		Mikrodalga fırın / Tost makinesi + Bilgisayar kasası / Vantilatör
	4 (P, Q, PF, THD <sub>i</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> ) 5 (P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H (2, 3, 5, 7)) 6 (P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H (2, 3, 5, 7, 9, 11)) 7 (P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H (2, 3, 5, 7, ... ,15)) 8 (P, Q, S, PF, THD <sub>i</sub> , H (2, 3, 5, 7, ... ,21))		Mikrodalga fırın / Tost makinesi + Buzdolabı / Vantilatör
	9 (P, Q, S, PF, cosφ, THD <sub>i</sub> , H (2, 3, 5, 7, ... ,21))		Mikrodalga fırın saç kurutma makinesi

Kümeleme sonuçları göstermektedir ki, 17 cihazın enerji tüketimlerinin genel olarak belirgin farklara sahip olmasından dolayı tek olarak alt gruplara dağıldığını, aynı alt gruplarda toplanan cihazların ise harmonik bileşenlerinde belirgin farklar görülmektedir. Bu durum, yeterli sayıda ve hassas öz nitelik seçimi cihazların enerji tüketim karakterlerini ayırtmak için kritik öneme sahiptir göstermektedir.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Elektrik enerjisinin evsel kullanımının hızla artması ve yeni teknolojilerin eklenmesi, bu yükleri izleme ve denetleme ihtiyacını da beraberinde getirmektedir. Hem ekonomik hem de etkin bir şekilde bu problemi çözmek için makine öğrenmesi algoritmaları öne çıkmaktadır. Ancak bu algoritmaları uygulamak için ilk olarak cihazların özniteliklerini belirlemek gerekmektedir.

17 adet evsel cihazın temel elektriksel güç parametreleri (S, P, Q, ...) ve harmonik bileşenleri, Akıllı Ev laboratuvarında gerçek ölçümler yapılarak belirlenmiştir. Bu ölçümler, öznitelik olarak K-Means algoritmasında kullanılarak kümeleme analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda farklı kümelemeler için SSE değerleri incelenmiş ve yeterli sayıda öznitelik dikkate alındığında her bir cihazın farklı örüntüye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç, merkezi bir noktadan ayrıntılı ölçümler neticesinde her bir evsel cihazın toplam yük içerisinde bulunabileceğini göstermektedir.

Makine öğrenmesi algoritmalarının evsel yük izleme sistemlerine dahil edilmesi sayesinde, yüklerin izlenmesi ve denetlenmesi daha az maliyetli ve daha kolay olacaktır. Bu da, gerçek zamanlı tarifelendirme ve yük kaydırma gibi talep cevabı uygulamalarına geçişi hızlandıracaktır.

## Kaynaklar

- [1] Kekezoğlu B, Bozkurt A, Arıkan O, Kocatepe C, Yumurtacı R, Baysal M. Assessment of Power Quality Terms on Energy Distribution Systems: A Case Study of Istanbul. *Prz. Elektrotechniczny* 2012; 88(11): 157–160.
- [2] Utley JJ, Shorrock LD. Domestic energy fact file 2008. United Kingdom: Department of Energy and Climate Change 2008.
- [3] Ehrhardt-Martinez K, Donnelly KA. Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities. USA: American Council for an Energy-Efficient Economy 2010.
- [4] Hart GW. Nonintrusive Appliance Load Monitoring. *Proceedings of the IEEE* 1992; 80(12): 1870-1891.
- [5] Zoha A, Gluhak M, Imran MA, Rajasegarar S. Non-intrusive Load Monitoring approaches for disaggregated energy sensing: A survey. *Sensors* 2012; 12(12): 16838–16866.
- [6] Selvam MM, Gnanadass R, Padhy NP. Fuzzy based clustering of smart meter data using real power and THD patterns. *Energy Procedia* 2017; 117: 401–408.
- [7] Huang SJ, Hsieh CT, Kuo LC, Lin CW, Chang CW, Fang SA. Classification of home appliance electricity consumption using power signature and harmonic features. *IEEE PEDS* 2011; 5-8 December 2011; Singapore. pp. 596–599.
- [8] Yang J, Yang Y, Chen J, Fu L, He Z. Determining the harmonic contributions of multiple harmonic sources using data clustering analysis. 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST); 8-11 September 2015; Vienna, Austria. pp. 405–411.
- [9] Kelly J, Knottenbelt W. Neural NILM: Deep neural networks applied to energy disaggregation. *Neural and Evolutionary Computing*; 4-5 November 2015; Seoul, South Korea. pp. 55–64.
- [10] Altrabalsi H, Stankovic L, Liao J, Stankovic V. A low-complexity energy disaggregation method: Performance and robustness. 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG); 9-12 December 2014; Orlando, FL, USA. pp. 1–8.
- [11] Wang Y, Chen Q, Zhang M, Wang K, Zhao Y. Load profiling and its application to demand response: A review. *Tsinghua Science and Technology* 2015; 20(2): 117–129.
- [12] Egarter D, Bhuvana VP, Elmenreich W. PALDI: Online load disaggregation via particle filtering. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2015; 64(2): 467–477.
- [13] Machlev R, Levron Y, Beck Y. Modified Cross-Entropy Method for Classification of Events in NILM Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid* 2019; 10(5): 4962–4973.
- [14] Çakmak Z, Uzgören N, Keçek G. Kümeleme Analizi Teknikleri ile İllerin Kültürel Yapılarına Göre Sınıflandırılması ve Değişimlerin İncelenmesi 2005; 2005(12).
- [15] Loochach R, Garg K. Effect of Distance Functions on Simple K-means Clustering Algorithm. *International Journal of Computer Applications* 2012; 49(6): 7–9.
- [16] Omran MGH, Engelbrecht AP, Salman A. An overview of clustering methods. *Intelligent Data Analysis* 2007; 11(6): 583–605.
- [17] Arillaga J, Watson NR. *Power System Harmonics*. 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2003.
- [18] Çayır A, Yenidoğan I, Dağ H. Konutların günlük elektrik güç tüketimi tahmini için uygun model seçimi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2018; 30(3): 15-21.
- [19] Sun M, Nakoty FM, Liu Q, Liu X, Yang Y, Shen T. Non-Intrusive load monitoring system framework and load disaggregation algorithms: A survey. 2019 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMEchS); 26-28 August 2019; Kusatsu, Shiga, Japan. pp. 284-288.
- [20] Rashid H, Singh P, Stankovic V, Stankovic L. Can non-intrusive load monitoring be used for identifying an appliance's anomalous behaviour. *Applied Energy* 2019; 238, 796-805.



## Bingöl Düzağaç Kavşağının Rotor Tipi Turbo Dönel Kavşak Olarak Düzenlemesi Durumu için Kapasite Hesaplarının Ön Çalışması

İhsan GÜZEL<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

\*<sup>1</sup> iguzel@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 04/02/2020;

Kabul/Accepted: 06/10/2020)

**Öz:** Çok şeritli dönel kavşakların alternatif bir formu olan turbo dönel kavşaklar, kapasite ve güvenliğinin çok şeritli dönel kavşaklara göre avantajlarından dolayı son yıllarda birçok ülkede tasarım rehberleri hazırlanarak uygulamalarına başlanılmıştır. Bu çalışmada turbo kavşakların güvenlik ve kapasite üstünlükleri göz önüne alınarak Bingöl Düzağaç mevkiinde bulunan sinyalizasyonlu ana yol, tali yol kavşağında, yol kullanıcısı ve taşıt işletme maliyetlerinin azaltılması için turbo dönel kavşak olarak düzenleme ön çalışması yapılmıştır. Bu kavşakta belirlenen senaryoya göre devlet yolunda trafik akımının alt geçitli veya alt geçitsiz sağlanması durumunda rotor tipi turbo kavşakların sinyalizasyonuz uygulanması için kapasite hesaplanmıştır. Alt geçitli turbo kavşağın alt geçitsiz turbo kavşağa göre kavşak kollarının şerit doygunluk yüzdelerinde ortalama 4 kat azalma olmasına rağmen; ana konumda bulunan Bingöl Sanayi ve tali konumda bulunan Bingöl Şehir Merkezi kollarında trafik artışı olması durumunda sola dönlüşlerin üst geçitle sağlanması gerekeceği tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Turbo Kavşak, Kapasite, Altgeçit, Şerit, Doygunluk, Trafik Senaryosu.

### Preliminary Study of Capacity Calculations for Regulation as Rotor Type Turbo Roundabout Status of Bingol Duzagac Junction

**Abstract:** An alternative form of multi-lane roundabouts, turbo roundabouts; Due to the advantages of its capacity and safety compared to multi-lane roundabouts, design guides have been prepared and started to be implemented in many countries in recent years. In this study, a preliminary study was made for the turbo roundabouts in order to reduce road user and vehicle operating costs at the signaling main road secondary road junction in Bingol Duzagac location considering the safety and capacity advantages. According to the scenario determined at this intersection, capacity is calculated for the implementation of rotor type turbo junctions without signaling in case the traffic flow on the state road is provided with or without an underpass. Although there is an average 4 fold reduction in the strip saturation percentages of the junction arms of the underpass turbo junction compared to the turbo junction without underpass; It is determined that if there is an increase in traffic in the branches of 'Bingol Industrial Site' located in the main location and 'Bingol City Center' located in the secondary location, left turns will need to be provided by overpass.

**Key words:** Turbo Junction, Capacity, Underpass, Lane, Saturation, Traffic Scenario

#### 1. Giriş

Karayollarının kesişmesi, birleşmesi ve ayrılmasıyla teşekkül edilen kavşak alanları, karayolunun hız, işletme, kapasite, maliyet ve güvenlik faktörlerini etkilemektedir. Kavşaklar güvenlik, estetik, hizmet seviyesi ve ekonomik prensipleri gözönüne alınarak; sürekliliğin sağlanması, güvenliğin ve hızın artırılması, yeterli hizmet seviyesinin sağlanması, taşıt işletme maliyetlerinin azaltılması amacıyla sistem ve servis formunda eş düzey, farklı düzey ve seviye ayrımlı tiplerinde yapılmaktadır [1,2].

Kavşaklar çakışmaları azaltmak, kapasiteyi artırmak ve rahat manevra yapılmasını sağlayacak temel hedefler göz önünde bulundurularak; toplanan bölgesel ve trafik verilerine göre insan, trafik, güvenlik, ekonomiklik, kavşak alanlarının fonksiyonellik ve fiziksel faktörleriyle beraber; algi, manevra, kuyruk mesafesi unsurları dikkate alınarak tasarlanmaktadır [3].

Kavşaklarda kesişme kontrolleri pasif, aktif ve kısmi kontrol seviyeleriyle yapılmakta olup; pasif kontrol trafik hacminin az olduğu kavşaklarda yol kullanıcılarının temel kurallara uyması koşuluyla kontrollerin düşey veya yatay işaretlemelerle, aktif kontroller sinyalizasyon ve farklı seviyeli geçişlerle, kısmi kontrol ise kanalize ayrımları ve dairesel adalarla sağlanmaktadır [4].

Trafik akımının merkezi bir ada etrafında yönlendirildiği ve ada etrafında araçların ilk geçiş hakkına sahip olduğu işaretlerle belirtilerek; kesişmelerin kısmi kontrolle önlenmeye çalışıldığı modern dönel kavşaklarda, yakıt

\* Sorumlu yazar: [iguzel@bingol.edu.tr](mailto:iguzel@bingol.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: 0000-0002-9368-8902

tüketimi hava kirliliği, durma gecikme süreleri ve kaza sayılarında ortalama olarak %40 oranında azalmaktadır [5,6].

Kapasite ve güvenlik avantajları nedeniyle modern dönel kavşakların alternatif olarak düşünülen turbo kavşaklarla ilgili yapılan bazı çalışmalara ait sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

Vincenzo, dönel kavşağa giren iki kolun girişi iki, çıkışları tek ve diğer kollarının giriş çıkışları tek şeritli olan mevcut iki şeritli sıkıştırılmış dönel kavşağın performansının artırılması için kollarının giriş çıkışları iki şeritli olan turbo dönel kavşağa dönüştürülmesi çalışmasında; trafik akımının fazla olduğu kollarında kapasitenin ortalama %40 arttığını, simülasyon çalışmasında ise kuyruk boyunun %90 oranında azaldığını belirlemiştir [7].

Pitlova, giriş ve çıkışları tek şeritli olan dört kollu mevcut dönel kavşağın turbo kavşak tiplerine dönüştürülmesi halinde, teorik olarak hesapladığı kapasite analizlerine göre turbo kavşaklarda taşıtların bekleme süresi 10 kat azalmıştır [8].

Skavania, Çek Cumhuriyetinde çeşitli tiplerde yapılan turbo kavşak kapasitelerinin, kavşak kollarının giriş çıkış şerit sayılarına ve kollarında trafik akım özelliklerine göre değişmekle beraber 2700 taşıt/saat ile 3800 taşıt/saat arasında olduğunu; ayrıca milyon taşıt başına kaza sayısının ortalama %60 azalma olduğunu belirtmiştir [9].

Babokic, Zagreb'te bulunan dört kollu sinyalizasyonlu bir kavşağın dönel ve turbo kavşak olarak düzenlemesi durumunda, mikro simülasyon yöntemleriyle yaptığı hesaplamalar sonucunda, turbo kavşak kollarında elde edilen kuyruk uzunluğu, taşıt gecikmesi, seyahat süresi ve emisyon yayılımı önemli oranda azaldığı görülmüştür [10].

Silva, Portekiz'in Lizbon şehrinde iki kolunun giriş kapasitesi yüksek olan mevcut bir dönel kavşağın, turbo kavşak yapılması durumunda, bu kollarında kapasitesinin ortalama %20 düşeceği hesaplamış; ayrıca turbo kavşakların aynı boyutta dönel kavşaklara göre kapasitesinin bir miktar az olacağını belirtmiştir [11,12].

Izadi, pik saatte dört kolunun her birimde trafik hacmi 1000 taşıtın üzerinde olan dönel kavşakla, turbo dönel kavşağı trafik performansı açısından karşılaştırma çalışmasında; turbo kavşakta seyahat, durma gecikme sürelerinin ve kuyruk uzunluğunun azaldığını göstermiştir [13].

Guerrieri ve Corriere, merkez ada etrafında şerit sayıları ve kollara giriş çıkış şerit sayıları iki olan dönel kavşakla turbo dönel kavşağı günlük kapasiteleri karşılaştırmış; turbo kavşakların yaklaşık olarak %20 oranında günlük kapasitesinin fazla olduğu belirlemiştir [14].

Turbo kavşakların yukarıda belirtilen olumlu sonuçlar göz önünde bulundurularak; Bingöl ilinin yerleşim alanından batı doğu yönünde geçen 6,80 km devlet yolu (Elazığ-Muş) üzerinde bulunan mevcut aktif kontrollü altı kavşaktan, yıllık ortalama günlük trafiği (YOGT) en yüksek olan Düzağaç kavşağının sinyalizasyon nedeniyle oluşan taşıt işletme maliyetlerinin azaltılması için literatür incelemelerinde ülkenizde uygulaması olmayan turbo kavşak olarak düzenlenmesinin araştırılmasının önemli olduğu düşünüldükçe bu çalışma yapılmıştır.

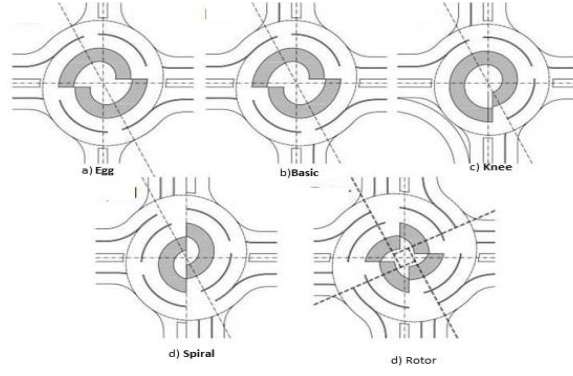
## 2. Turbo Kavşak

Geçmişte uygulanması zorunlu olan dönel kavşak koşullarının değişmesi ve bu kavşakların kısmi dezavantajları nedeniyle son zamanlarda belli ülkelerde iki şeritli dönel kavşakların yenilikçi bir düzenlemesi olan turbo dönel kavşak uygulamalarına başlanılmıştır. Turbo kavşaklar giriş veya çıkış kollarında trafik hacmine göre merkezi ada çapının değiştirilmesiyle elde edilen spirallerin belirli yön akışlarının şeritler boyunca fiziksel olarak ayrıldığı ve dönel kavşakların şiddetli çakışma noktalarının bazılarını kaldırarak trafik akışının sağlandığı çok şeritli dönel kavşak türüdür [15,16].

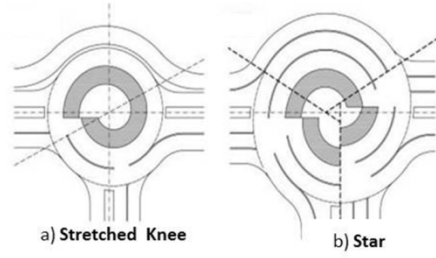
Hollanda'nın Delft Üniversitesi araştırmacısı Dr. Lambertus Fortuijn tarafından 1998 yılında geliştirilen turbo dönel kavşaklar, yapılan analizler sonucunda 2008 yılında ilk olarak Hollanda'da tasarım rehberi hazırlanmıştır. Almanya gibi gelişmiş ülkelerin de yer aldığı bazı ülkeler tasarım rehberleri yayınlamış olup; Amerika'da ise araştırmalar devam etmektedir. Yayımlanan rehberlerde geometrik tasarım;

- Mevcut kavşak türlerinden birini seçmek
- Tasarım aracını tanımlama,
- Turba Blok Şablonunu belirlemek,
- Turbo kavşağın diğer elemanlarının tasarımı aşamalarından
- Tasarım araçlarının yatay süpürme ve hız analizi aşamalarıyla yapılmaktadır.

Turbo dönel kavşakların üç kollu ve dört kollu tiplerinde (Şekil 1-2) egg, basic turbo, knee, spiral ve stretched-knee formları kollarında trafik akışlarından birinin fazla olduğu durumlarda, rotar ve star formları ise kollarında trafik akışının yakın olduğu durumlarda önerilmektedir [17].

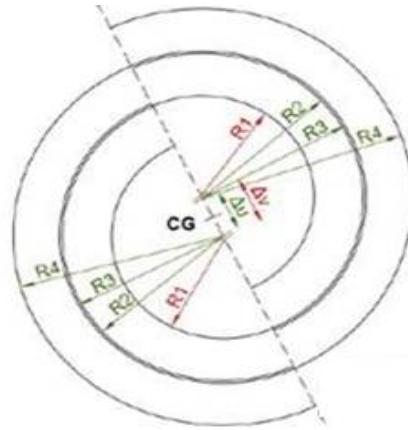


Şekil 1. Dört kollü kavşak formları[17]



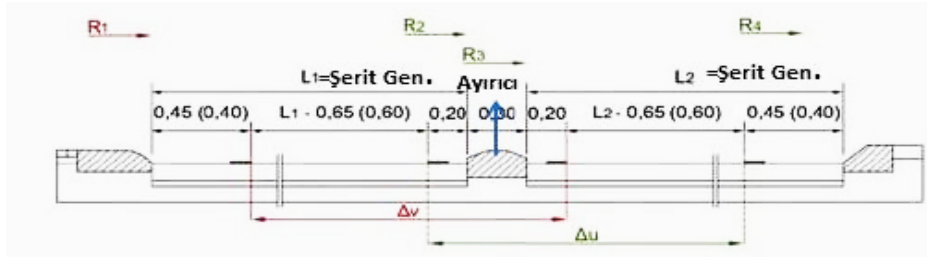
Şekil 2. Üç kollü kavşak formları[17]

Tasarımın en önemli elemanlarından olan iç-dış daire yarıçapları, şerit genişlikleri, iç-dış merkezler arasında farklar ve en kesit Şekil 3,4'de, bu elemanların geniş ve mini turbo kavşaklar için Hollanda'ya ait değerleri ise Tablo 1'de gösterilmiştir. Bu değerlere göre geniş bir turbo kavşak için tasarım şartlarını sağlanması koşuluyla, geniş turbo kavşaklar için yaklaşık 3000 m<sup>2</sup>, küçük turbo kavşaklar için ise 1500 m<sup>2</sup> alan gerekmektedir.



Şekil 3. Turbo kavşak blok elemanları[17]





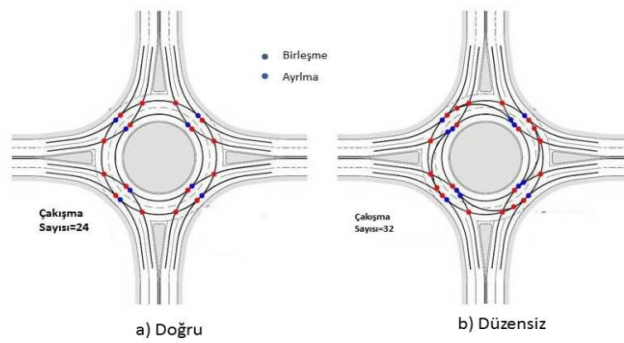
Şekil 4. Turbo Kavşak en kesiti[17]

Tablo 1. Turno kavşak yatay eksen elaman boyutları[17]

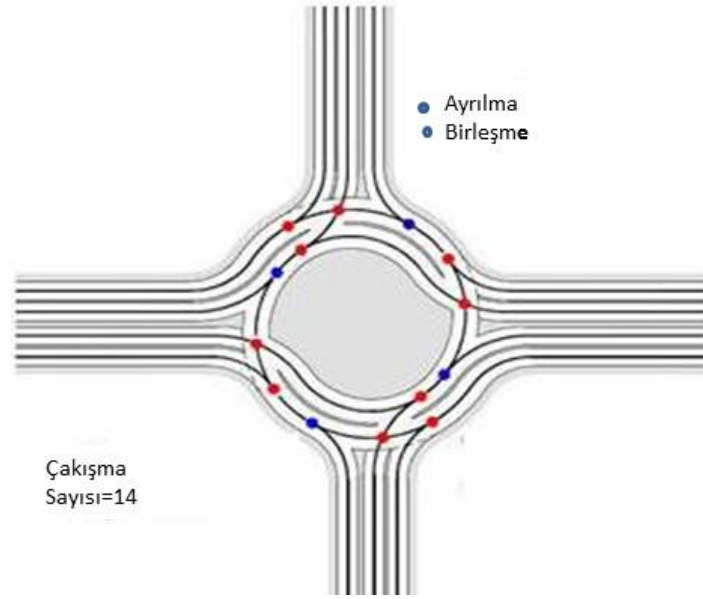
Kavşak Elemanı	Turbo Kavşak Tipi	
	Mini	Geniş
R <sub>1</sub> (m)	10,50	20,00
R <sub>2</sub> (m)	15,85	24,90
R <sub>3</sub> (m)	16,15	25,20
R <sub>4</sub> (m)	21,15	29,90
L <sub>1</sub> (Şerit Gen (m))	5,35	4,90
L <sub>2</sub> (Şerit Gen(m))	5,00	4,70
Δv(m)	5,75	5,15
Δu(m)	5,05	4,75

Turbo kavşakların kavşak alanı ve ilk maliyetleri fazla olmasına karşın sinyalize kavşaklara göre kapasitesi yaklaşık %30 fazla olması nedeniyle kuyruk uzunluğu ve gecikmeler azaldığından yaşam döngü maliyetleri daha düşüktür [18].

Çok şeritli dönel kavşaklarla turbo dönel kavşaklar güvenlik açısından karşılaştırıldığında Şekil 5'te görüleceği üzere çok şeritli dönel kavşaklarda sürücünün doğru ve düzensiz davranış biçimine göre olası çakışma sayıları sırasıyla 24, 32 noktada, turbo kavşaklarda ise kavşak kolu sayısı ve tipine göre çakışma sayıları 9 ile 24 nokta arasında değişmektedir. Trafik işaretleriyle düzenlenmiş pasif kontrollü kavşaklara göre güvenliği yüksek olan basit turbo kavşaklarda ise ayırıcılar nedeniyle çakışma 14 noktada (Şekil 6) meydana gelmektedir.



Şekil 5. Sürücü davranışına göre dönel kavşaklarda olası çakışma sayısı[11]



Şekil 6. Basit turbo kavşakların olası çakışma sayısı[11]

Dönel kavşak kollarının kapasite hesaplamalarında kullanılan formül parametreleri kavşak tasarımının ana prensiplerinden güvenlik ve hizmet düzeyi seviyesini etkileyen en önemli faktörlerden olan insan ve trafik faktörleriyle ilişkilidir. Kapasite hesaplamaları genel olarak alan gözlemlerine dayanan regresyon analizi, boşluk kabulü teorisi olmak üzere iki metodoloji ile analitik ve simülasyon modellerle yapılmaktadır[19]. Boşluk kabulüne dayanan metodoloji modelleri kavşakta dağılan trafik akışının üssel bir fonksiyonu olarak kapasiteyi ifade eden analitik modellerdir. Çok sayıda modelin olduğu boşluk kabulü metodolojisine tek şeritli giriş için Siegloch, Cowan-M3 modeli, iki şeritli girişler için ise iki şeritli dönel kavşaklar için tali yol kapasitesini Cowan-M3 dağılımı kullanarak hesaplayan Troutbeck modelini genişleten Cowan-M3 2Lve Brilon modeli örnek verilebilir [20].

Turbo kavşakların ilk tasarımını yapan Fortuijn, Troutbeck'in modelini genişleterek ve Hollanda'da kavşak alanlarından elde edilen veriler sonucunda Tanner Demet Modelinin  $\phi$  parametresini dikkate alarak; ana yönde trafiğin olduğu kollarda sağa sola, tali yollarda ise sağa dönüş kapasitesi Eşitlik 1 ile, tali kollarda sola dönüş kolları için ise Eşitlik 2 ile hesaplamıştır [21].

$$C = q_y \left( 1 - \frac{\Delta q_y}{3600} \right) \cdot \frac{e^{-\frac{q_y(T_y - \Delta)}{3600}}}{1 - e^{-\frac{q_y T_f}{3600}}} \quad (1)$$

$$C = (q_u + q_y) \left( 1 - \frac{\Delta q_u}{3600} \right) \left( 1 - \frac{\Delta q_y}{3600} \right) \frac{e^{-\frac{(-q_u(T_u - \Delta) - q_y(T_y - \Delta))}{3600}}}{1 - e^{-\frac{(-q_u + q_y) T_f}{3600}}} \quad (2)$$

C kavşak kolu kapasitesi,

$q_y, q_u$ : Kavşak içerisinde giriş kolu önüne yakın ve uzak şeritlerde trafik akımı

$T_y$ : Kavşak içerisinde giriş kolu önüne yakın şeritlerde taşıtlar arası takip aralığı (sn)

$T_u$ : Kavşak içerisinde giriş kolu önüne uzak şeritlerde taşıtlar arası takip aralığı (sn)

$T_f$ : Giriş yönünde taşıtlar arası takip aralığı (sn),

$T_c$ : Şeritlerde kritik taşıt aralığı (sn)

$\Delta$ : Kavşak şeritlerinde taşıtlar arasında minimum takip aralığı (1,8 sn-2 sn)

Genelleştirici Hagring kapasite eşitliğimde ana yön akımından bağımsız tali yönlerin kapasite hesaplamaları; tali yönden gelecek trafik akımının önündeki şerit sayısına göre sağa dönüş için Eşitlik 3 ile sola dönüş için ise Eşitlik 4 ile yapılmaktadır [22].

$$C = \frac{q_{u,y} \phi e^{-\lambda(T_c - \Delta)}}{1 - e^{-\lambda T_f}} \quad (3)$$

$$C = \frac{\exp\{-(\lambda_1 + \lambda_2)(T_c - \Delta)\} (\lambda_1 + \lambda_2) \phi_1 \phi_2}{[1 - \exp[-T_f(\lambda_1 + \lambda_2)]](\phi_1 + \Delta\lambda_1)(\phi_2 + \Delta\lambda_2)} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\phi q_c}{1 - \Delta q_{y,u}} \quad (5)$$

$$q_{y,u} < 0,5 \text{ ise } \phi = 1$$

$$0,178 < q_{y,u} \leq 0,5 \text{ ise } \phi = 1,553 \cdot (1 - 2 \cdot q_{y,u}) \quad (6)$$

$$q_{yu} > 0,5 \text{ ise } \phi = 0$$

$\lambda_i, \phi_i$ : Kavşağa giriş kolu önünde Cowan M3 Model parametreleri,  
 $q_1, q_3, q_2$ : Kavşağa girecek trafiğin sola, sağa ve karşı kola akım talebi,

Ana ve tali girişlerde trafik akımı oranları ve şeritlerde trafik akımı (Şekil 7) hesaplama eşitlikleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\rho_a = \frac{C_{ansağ}(q_1 + q_2) - C_{anasol}q_3}{q_2(C_{ansağ} + C_{anasol})} \quad \rho \in (0,1) \quad (7)$$

$$\rho_t = \frac{C_{talisağ}(q_1 + q_2 + q_3)}{q_2(C_{talisağ} + C_{talisol})} \quad \rho \in (0,1) \quad (8)$$

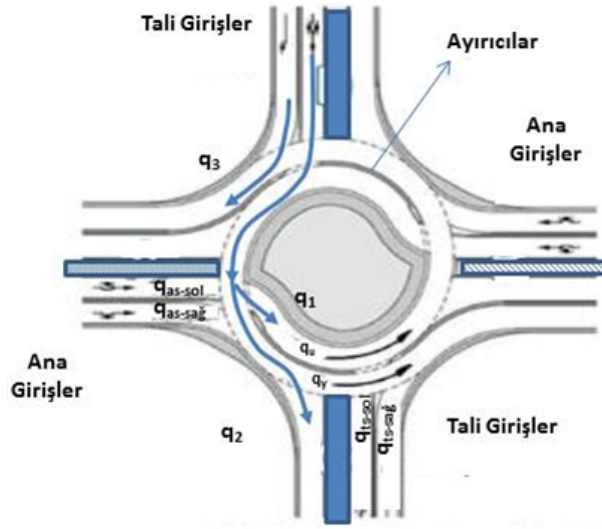
$$q_{aş-sol} = q_1 + (1 - \rho_a) \quad (9)$$

$$q_{aş-sağ} = q_2 \rho_a + q_3 \quad (10)$$

$$q_{tş-sol} = (q_1 + q_2) + (1 - \rho_t)q_3 \quad (11)$$

$$q_{tş-sağ} = \rho_t \cdot q_3 \quad (12)$$

$\rho_a, \rho_t$ : Ana ve tali yönlerde trafik akımı oranları,  
 $C_{ansağ}, C_{anasol}$ : Ana girişlerin sağa ve sola dönüş kapasiteleri  
 $C_{talisağ}, C_{talisol}$ : Tali girişlerin sağa ve sola dönüş kapasiteleri  
 $q_{aş-sol}, q_{aş-sağ}$ : Ana girişlerin sağ ve sol şeritlerde trafik akımı  
 $q_{tş-sol}, q_{tş-sağ}$ : Tali girişlerin sağ ve sol şeritlerde trafik akımı.



Şekil 7. Basit turbo kavşaklarda ana ve tali kollarda trafik akımı

### 3. Metodoloji

Bingöl il merkezinin güneyiyle, Elâzığ-Muş devlet yoluna bağlantıyı sağlayan mevcut Düzağaç kavşağında, Karayolları Genel Müdürlüğü'nün sorumluluğunda bulunan devlet yolunun 2016 yılı ortalama günlük trafiği Uydukent kolunda ise 2019 yılı zirve saatte (16.30-17.30) trafik sayımları göre kollarda uygulanan sinyalizasyon süreleri dikkate alınarak yol kullanıcı maliyetleri içerisinde bulunan taşıt işletme maliyetlerinden yakıt tüketimi ve durma ve hareketlenme günlük ortalama maliyetleri hesaplanacaktır. Bu maliyetlerin azaltılması için mevcut kavşağın son yıllarda Avrupa ülkelerinde yaygın olarak yapılmaya başlanan turbo dönel kavşak veya alt geçitli turbo dönel kavşak yapılması durumunda kavşak kollarında belirlenen senaryoya göre kapasite ve kavşak kollarında şerit doygunluk yüzdeleri hesaplanarak performansı değerlendirilecektir.

### 4. Düzağaç Kavşağının Genel Değerlendirmesi

Düzağaç kavşağının mevcut durumu ve kollarda uygulanan sinyalizasyon süreleri Şekil 8'de gösterilmiş olup; bu kavşağın sinyalizasyon süreleri gün boyunca aynı olduğu kabul edildiğinde her bir kol 24 saat içerisinde ortalama 5,50 saat (100x30x24/130) trafiğe açık olacağından bu durum kavşağı kullanan yol kullanıcı maliyetlerini artırmaktadır. Bu kavşağa ait kolların yıllık ortalama günlük trafik sayısının % 80'in 08.00-20.00, %20'sinin 20.00-08.00 saatleri arasında geçtiği kabul edilmiştir. Bu durumda ortalama 130 sn içerisinde kavşağa girecek her bir kolda ortalama olarak bekleyecek ve geçecek taşıt sayıları hesaplanmamış, zirve saatte taşıtların birim otomobil eşdeğerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Kavşağa giren taşıtların kırmızı ışık nedeniyle durması ve sarı ışıkla beraber ivmelenecek hızlanması durumunda NCHRP 133 Metoduna [23] göre hesaplanan maliyetler Tablo 3'de taşıtların beklerken rölantide çalışması durumunda ise yakıt birim fiyatı ortalama 6,50 TL alınarak hesaplanan maliyetler Tablo 4'de gösterilmiştir [26]. Kavşak kullanıcılarının seyahat, gecikme, emisyon, motor yağı ve taşıt amortisman maliyetleri hesaplamalara katılmamasına rağmen bu kavşağın yol kullanıcılarına yıllık maliyeti 3.760.960 TL (8433x365+1871x365) olup; günlük olarak taşıt başına ortalama maliyet ise 0,92 TL'dir

Bingöl Düzağaç Kavşağının Rotor Tipi Turbo Dönel Kavşak Olarak Düzenlemesi Durumu için Kapasite Hesaplarının Ön Çalışması



Şekil 8. Düzağaç kavşak kollarının sinyalizasyon süreleri

Tablo 2. Kavşak kollarında 08.00-20.00,20.00-08.00 saatleri arası bir fazda geçen ve bekleyen taşıt sayıları

Kavşak Kolu	Taşıt	2015 Yılı YOGT (A)	Ort. Bir Yöne YOGT (B=A/2)	Proje 30. Saat Trafiği (C=B/6)	Otomobil Eşdeğer Faktörü (D)	Proje 30. Saat Birim Otol Eşdeğeri (E=DxC)	Saatler (08.00-20.00) Arası 100 Saniyede Ort. Bekleyen Taşıt Sayısı (F1=100x0,8xB / (12x3600))	Saatler (08.00-20.00) Arası 30 Saniyede Ort. Geçen Taşıt Sayısı (G1=30x0,8xB / (12x3600))	Saatler(20.00-08.00) Arası 100 Saniyede Ort. Bekleyen Taşıt Sayısı (F2=100x0,2xB / (12x3600))	Saatler (20.00-08.00) Arası 30 Saniyede Ort. Geçen Taşıt Sayısı (G2=30x0,2xB / (12x3600))
Bingös Sanayi	Otomobil	4965	2483	414	1	414	4,60	1,38	1,15	0,34
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	563	282	47	1,2	56	0,52	0,16	0,13	0,04
	Otobüs	114	57	10	1,5	14	0,11	0,03	0,03	0,01
	Kamyon	1238	619	103	2	206	1,15	0,34	0,29	0,09
	Kamyon+Römork	231	116	19	2,2	42	0,21	0,06	0,05	0,02
	<b>TOPLAM</b>	<b>7111</b>	<b>3556</b>	<b>593</b>		<b>733</b>	<b>6,58</b>	<b>1,98</b>	<b>1,65</b>	<b>0,49</b>
Emiyet İl Müd	Otomobil	3484	1742	290	1	290	3,23	0,97	0,81	0,24
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	241	121	20	1,1	22	0,22	0,07	0,06	0,02
	Otobüs	106	53	9	1,5	13	0,10	0,03	0,02	0,01
	Kamyon	419	210	35	2	70	0,39	0,12	0,10	0,03
	Kamyon+Römork	266	133	22	2,2	49	0,25	0,07	0,06	0,02
	<b>TOPLAM</b>	<b>4516</b>	<b>2258</b>	<b>376</b>		<b>444</b>	<b>4,18</b>	<b>1,25</b>	<b>1,05</b>	<b>0,31</b>
Bingöl Merkezi	Otomobil	4319	2160	360	1	360	4,00	1,20	1,00	0,30
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	478	239	40	1,1	44	0,44	0,13	0,11	0,03
	Otobüs	18	9	2	1,5	2	0,02	0,01	0,00	0,00
	Kamyon	993	497	83	2	166	0,92	0,28	0,23	0,07
	Kamyon+Römork	106	53	9	2,2	19	0,10	0,03	0,02	0,01
	<b>TOPLAM</b>	<b>5914</b>	<b>2957</b>	<b>493</b>		<b>591</b>	<b>5,48</b>	<b>1,64</b>	<b>1,37</b>	<b>0,41</b>
Uydükent *	Otomobil	1629	1629	272	1	272	3,02	0,91	0,75	0,23
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	657	657	110	1,1	120	1,22	0,37	0,30	0,09
	Otobüs	81	81	14	1,5	20	0,15	0,05	0,04	0,01
	Kamyon	18	18	3	2	6	0,03	0,01	0,01	0,00
	Kamyon+Römork	9	9	2	2,2	3	0,02	0,01	0,00	0,00
	<b>TOPLAM</b>	<b>2394</b>	<b>2394</b>	<b>399</b>		<b>422</b>	<b>4,43</b>	<b>1,33</b>	<b>1,11</b>	<b>0,33</b>

\*2019 Yılı zirve saat(16.30-17.30) taşıt sayımları

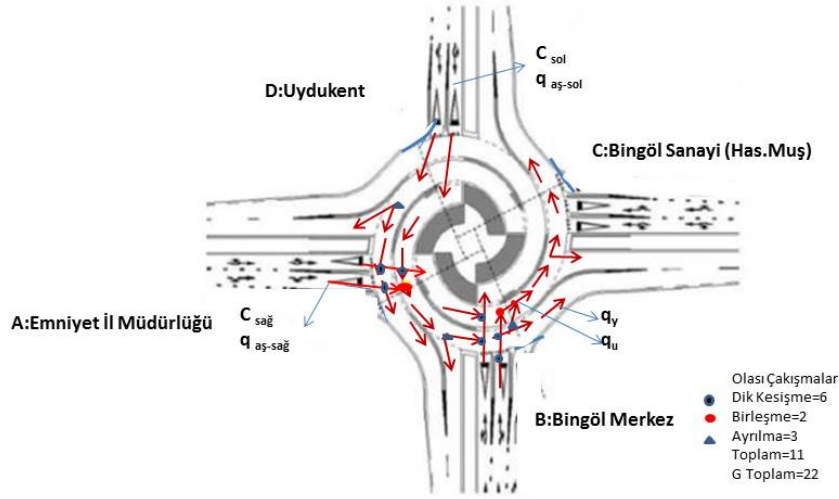
Tablo 3. Taşıtların durma ve ivmelenme maliyetleri

Kavşak Kolu	Ort Bekleyen Taşıt Sayısı (100 Saniye)				Günde Ortalama Bekleyen Taşıt Sayısı (H=Tx86400/130)	B Fiyat \$/1000 Durma (I)	Maliyet (\$) (J=H x I/1000)
	Taşıt	Saat (08.00-20.00) Aralığında (F1)	Saat (20.00-08.00) Aralığında (F2)	Toplam (T)			
Bingöl Sanayi	Otomobil	4,60	1,15	5,75	3819,23	38,83	148,301
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,52	0,13	0,65	433,08	38,83	16,816
	Otobüs	0,11	0,03	0,13	87,69	86,64	7,598
	Kamyon	1,15	0,29	1,43	952,31	347,44	330,870
	Kamyon+ Römork	0,21	0,05	0,27	177,69	347,44	61,737
Emniyet İl Müd.	Otomobil	3,23	0,81	4,03	2680,00	38,83	104,064
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,22	0,06	0,28	185,38	38,83	7,198
	Otobüs	0,10	0,02	0,12	81,54	86,64	7,064
	Kamyon	0,39	0,10	0,48	322,31	347,44	111,983
	Kamyon+ Römork	0,25	0,06	0,31	204,62	347,44	71,092
Bingöl Merkez	Otomobil	4,00	1,00	5,00	3322,31	38,83	129,005
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,44	0,11	0,55	367,69	38,83	14,277
	Otobüs	0,02	0,00	0,02	13,85	86,64	1,200
	Kamyon	0,92	0,23	1,15	763,85	347,44	265,391
	Kamyon+ Römork	0,10	0,02	0,12	81,54	347,44	28,330
UyduKent	Otomobil	3,02	0,75	3,77	2506,15	38,83	97,314
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	1,22	0,30	1,52	1010,77	38,83	39,248
	Otobüs	0,15	0,04	0,19	124,62	86,64	10,797
	Kamyon	0,03	0,01	0,04	27,69	347,44	9,621
	Kamyon+ Römork	0,02	0,00	0,02	13,85	347,44	4,811
F1,F2 Tablo -2'de açıklanmıştır.						<b>TOPLAM (\$)</b>	1466,717
						<b>2019 Yılı TOPLAM (TL)</b>	8433,624

Tablo 4. Taşıtların rolantide çalışma maliyetleri

Kavşak Kolu	Ortalama Bekleyen Taşıt Sayısı (100 Saniye)				100 Saniyede Rolantide Yakıt Tüketimi Lt (L)	2019 Yılı Yakıt Birim Fiyatı TL (M)	100 Saniyede Maliyet TL (MM =MxLxTB)	Günlük Maliyet TL (GM = 86400xMM/130)
	Taşıt	Saat(08.00-20.00) Aralığında (F1)	Saat(20.00-08.00) Aralığında (F2)	Ort Toplam (TB=(F1+F2)/2)				
Bingöl Sanayi	Otomobil	4,60	1,15	2,87	0,028	6,5	0,532	353,66
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,52	0,13	0,33	0,042	6,5	0,089	58,90
	Otobüs	0,11	0,03	0,07	0,049	6,5	0,021	14,08
	Kamyon	1,15	0,29	0,72	0,049	6,5	0,230	152,94
	Kamyon+ Römork	0,21	0,05	0,13	0,049	6,5	0,043	28,54
Emniyet İl Müd.	Otomobil	3,23	0,81	2,02	0,028	6,5	0,373	248,17
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,22	0,06	0,14	0,042	6,5	0,038	25,21
	Otobüs	0,10	0,02	0,06	0,049	6,5	0,020	13,10
	Kamyon	0,39	0,10	0,24	0,049	6,5	0,078	51,76
	Kamyon+ Römork	0,25	0,06	0,15	0,049	6,5	0,049	32,86
Bingöl ŞMerkez	Otomobil	4,00	1,00	2,50	0,028	6,5	0,463	307,65
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,44	0,11	0,28	0,042	6,5	0,075	50,01
	Otobüs	0,02	0,00	0,01	0,049	6,5	0,003	2,22
	Kamyon	0,92	0,23	0,57	0,049	6,5	0,185	122,67
	Kamyon+ Römork	0,10	0,02	0,06	0,049	6,5	0,020	13,10
UyduKent	Otomobil	3,02	0,75	1,89	0,028	6,5	0,349	232,07
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	1,22	0,30	0,76	0,042	6,5	0,207	137,46
	Otobüs	0,15	0,04	0,09	0,049	6,5	0,030	20,01
	Kamyon	0,03	0,01	0,02	0,049	6,5	0,007	4,45
	Kamyon+ Römork	0,02	0,00	0,01	0,049	6,5	0,003	2,22
<b>TOPLAM</b>						2,815	1871,09	

Kavşağı kullanan yol kullanıcılarının taşıt işletme maliyetlerinin (yakıt tüketimi, durma kalkma) azaltılması için mevcut Düzağaç kavşak alanında gerekli alt yapı düzenlemelerinde sonra, kavşağın sinyalizasyonu olarak turbo kavşakların en yüksek kapasiteli tiplerinden biri olan rotor tipi yapılması durumunda olası çakışmalar Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Rotor tipi turbo kavşak

## 5. Uygulanan Trafik Akımı Senaryoları

Kavşağın zirve saatte birim otomobil eşdeğerlerine göre kapasite hesaplamaları;2016 yılından sonra Karayolları Genel Müdürlüğünün sorumluluğundan çıkan Diyarbakır-Genç -Bingöl yolu (Bingöl Şehir Merkezi içinden kavşağa giriş kolu) 2019 yılı YOGT'si 2015 yılı YOGT'sine [24] göre %25, Elazığ-Muş Devlet yolunun (Emniyet Müdürlüğü, Bingöl Sanayi) 2019 yılı verileri yayınlamadığından diğer yıllara ait artışlar dikkate alınarak 2019 yılı YOGT'sini 2015 yılı YOGT'sine göre %20 arttığı kabul edilerek yapılmıştır. Tablo 2'de gösterilen zirve saatlerde birim otomobil eşdeğerleri 2019 yılına uyarlanarak Tablo 5'te verilen dağılım senaryosuna göre zirve saatte kollardan kavşağa gelen taşıt trafiğinin kavşak kollarına dağılım sayıları hesaplanmıştır.

Tablo 5. Kavşağa giren taşıt trafiğinin yönlere dağılımı

Kavşağa Giriş Kolu		Kollardan Kavşağa Giren Trafığın Zirve Saatlerde Dağılım Yönleri				
		A	B	C	D	TOPLAM
A:Emniyet İl Müdürlüğü 444 x 1,20=533	Dağılım Senaryosu %	5	40	45	10	100
	Taşıt Sayısı	27	213	240	53	533
B:Bingöl Merkez 591x1,25=739	Dağılım Senaryosu %	55	15	20	10	100
	Taşıt Sayısı	406	111	148	74	739
C:Bingöl Sanayi 733 x1,20=880	Dağılım Senaryosu %	50	40	5	5	100
	Taşıt Sayısı	449	352	44	44	880
D:Uydükent 2019 Yılı 422	Dağılım Senaryosu %	10	65	20	5	100
	Taşıt Sayısı	42	274	84	21	422

Kavşağa giriş kollarının önünde bulunan şeritlerde zirve saatlerde trafik akımı değerleri Tablo 5’te gösterilen senaryoya göre hesaplanarak Tablo 6’da gösterilmiştir. Bu değerlere göre en fazla trafik akımı Uydukent ve Emniyet Müdürlüğü kolları önünde meydana gelmiştir. Sola dönüşler için  $T_f=3,9$  sn  $T_c=2,1$ sn  $\Delta=2$ sn sağa dönüşler için  $T_f=3,6$ sn  $T_c=2,1$ sn  $\Delta=2$ sn alınarak [25]; kavşağa giriş kollarında şeritlerin doygunluk yüzdeleri Tablo 7’de belirtilen eşitliklerle hesaplanması sonucunda sol şeritlerde doygunluk, ortalama %50 seviyesine ulaştığı tespit edilmiştir.

**Tablo 6.** Kavşak kolu önünde şeritlerde trafik akım

Kavşağa Giriş Kolu	Kavşak Giriş Kolu Önünde Şeritlerde Trafik Akımı		
	Dönel Adaya Göre Şerit Yeri	Gelen Trafik Akım	Gelen Trafik Akım Sayısı (B.oto/sa)
A:Emniyet İl Müdürlüğü	Dış (Girişe yakın , $q_v$ )	BB CB DB TOPLAM	111 352 274 737
	İç (Girişe uzak, $q_u$ )	CC DC DD TOPLAM	44 84 21 150
B:Bingöl Şehir Merkezi	Dış (Girişe yakın , $q_v$ )	AC CC DC TOPLAM	240 44 84 368
	İç (Girişe uzak $q_u$ )	AD AA DD TOPLAM	53 27 21 101
C:Bingöl Sanayi	Dış (Girişe yakın , $q_v$ )	BD AD DD TOPLAM	74 21 53 148
	İç (Girişe uzak, $q_u$ )	BA BB DD TOPLAM	406 111 27 544
D:Uydukent	Dış (Girişe yakın , $q_v$ )	CA BA AA TOPLAM	440 406 27 873
	İç (Girişe uzak, $q_u$ )	CB BB CC TOPLAM	352 111 44 507

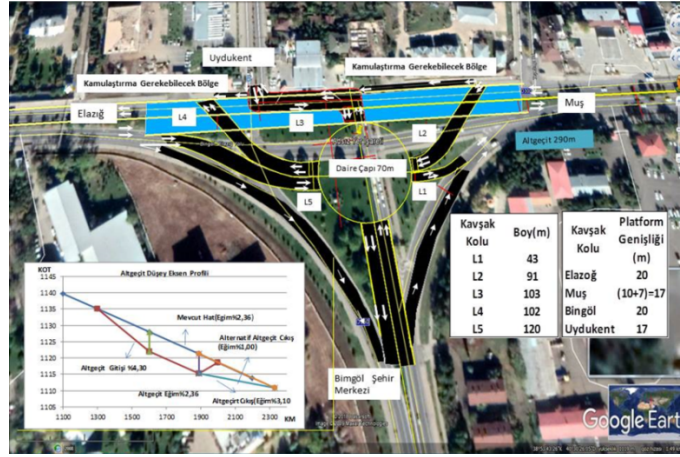
**Tablo 7.** Kavşak kollarının kapasiteleri ve şerit doygunluk yüzdeleri

Kavşağa Giriş Kolu	Kavşak Kolunun Sağa Sola Dönüş Kapasiteleri (B.Oto/sa)		Kavşağa Giriş Kolunda Sola ,Karşı Kola ve Sağa Dönen Taşıtlı Sayıları (B.Oto/sa)			Kollarda Sağ Şeridi Kullanma Oranı $\rho$ Eşitlik [7,8]	Düzeltilmiş $\rho^*$	İki Şeritli Giriş Kolunda Sağa Sola Dönüş Trafik Alımı (B.Oto/sa)		İki Şeritli Giriş Kolunda Şerit Doygunluğu (%)	
	$C_{sol}$ Eşitlik [4,5,6]	$C_{sağ}$ Eşitlik [4,5,6]	$q_1$	$q_2$	$q_3$			$Q_{sağ-sağ}$ Eşit. [10]	$Q_{sağ-sol}$ Eşitl. [9]	$D_{sağ}=Q_{sağ-sağ}/C_{sağ}$	$D_{sol}=Q_{sağ-sol}/C_{sol}$
A:Emniyet İl Müdürlüğü	647	727	80	240	213	0,287	0,287	282	251	38,79	38,79
B:Bingöl Merkez	1120	1174	517	74	148	3,119	1,000	222	517	18,88	46,20
C:Bingöl Sanayi	868	939	396	440	44	0,939	0,939	457	423	48,70	48,70
D:Uydukent	334	408	106	274	42	0,691	0,691	232	190	56,80	56,80

\* $\rho > 1$  ise  $\rho = 1$ ,  $\rho < 0$  ise  $\rho = 0$  alınmıştır [25]



Alt geçitsiz turbo kavşakta doygunluk seviyelerinin azaltılması için kavşağa giren kollarda sağa dönüşlerin kavşağa girmeden sağlanarak alt geçitli turbo kavşak seçeneği uygulanabilir olduğu Google Earth’de yapılan incelemelerden görülmüştür (Şekil 10). Bu durumda A-C ve C-A yönlerinde trafiğin Tablo 8’de gösterilen yüzdelerle alt geçit kullanım senaryosuna göre zirve saatte rotor tipi turbo kavşağı kullanacak taşıt sayıları hesaplanmıştır. Alt geçitli turbo kavşak tasarımında ekonomiklik göz önüne alınarak; mevcut kavşağın A-C, C-A ve B kollarının yatay güzergâhının değiştirilmemesi, kavşağın alanının genel görünümünün bozulmaması ve asgari kamulaştırma yapılmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 10. Düzağaç kavşağının alt geçitli turbo dönel kavşak düzenlenmesi

Tablo 8. Zirve saatlerde turbo kavşak kollarında taşıt sayıları

Kavşak Kolu	Taşıt	Proje 30. Saat Birim Eşdeğeri (E=DxC)	2019 Yılına Dönüşüm Katsayısı (DY)	Proje 30. Saat Trafiği Birim Otomobil Eşdeğeri (2019 Yılı Y <sub>T</sub> =E <sub>X</sub> DY)	Alt Geçitten Gecen % (AG)	Alt Geçitten Geçen Taşıt Sayısı (BS=AGxY T/100)	Sağa Dönüş % (SD)	Sağa Dönen B.Oto Sayısı (SDB=(YT-BS)xSD/100)	2019 Yılında Alt Geçit Üzerinde Turbo Kavşağı Kullanan (TK=YT-BS-SDB)
Bingöl Samayı (Hastane, Muş)	Otomobil	414	1,2	497	50	248	5	25	223
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	56	1,2	68	50	34	5	3	30
	Otobüs	14	1,2	17	50	9	5	1	8
	Kamyon	206	1,2	248	50	124	5	12	111
	Kamyon+ Römork	42	1,2	51	50	25	5	3	23
	<b>TOPLAM</b>	<b>733</b>	<b>1,2</b>	<b>880</b>		<b>440</b>		<b>44</b>	<b>396</b>
Emniyet İl Müd.	Otomobil	290	1,2	348	45	157	40	139	52
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	22	1,2	27	45	12	40	11	4
	Otobüs	13	1,2	16	45	7	40	6	2
	Kamyon	70	1,2	84	45	38	40	34	13
	Kamyon+ Römork	49	1,2	59	45	26	40	23	9
	<b>TOPLAM</b>	<b>444</b>	<b>1,2</b>	<b>533</b>		<b>240</b>		<b>213</b>	<b>80</b>
Bingöl-Şehir Merkezi	Otomobil	360	1,25	450	0	0	20	90	360
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	44	1,25	55	0	0	20	11	44
	Otobüs	2	1,25	3	0	0	20	1	2
	Kamyon	166	0	0	0	0	20	0	0
	Kamyon+ Römork	19	0	0	0	0	20	0	0
	<b>TOPLAM</b>	<b>591</b>	<b>1</b>	<b>507</b>		<b>0</b>		<b>101</b>	<b>406</b>
Uydükent	Otomobil	272	1	272	0	0	10	27	244
	Orta Yüklü Ticari Taşıt	120	1	120	0	0	10	12	108
	Otobüs	20	1	20	0	0	10	2	18
	Kamyon	6	1	6	0	0	10	1	5
	Kamyon+ Römork	3	1	3	0	0	10	0	3
	<b>TOPLAM</b>	<b>422</b>	<b>1</b>	<b>422</b>		<b>0</b>		<b>42</b>	<b>379</b>
	<b>G TOPLAM</b>	<b>2190</b>		<b>2342</b>		<b>680</b>		<b>401</b>	<b>1261</b>

Zirve saatte A-C ve C-A yönünde gidecek trafiğin ortalama %10'unun (A kolu 240x0,1=24; C kolu 440x0,10=44) bu kolların çıkışında bulunan yerleşim yerleri nedeniyle altgeçidi kullanmayacağı düşünülecek;

turbo kavşağa giren trafiğin alt geçitsiz turbo kavşak senaryosuna benzer bir senaryo ile yönlere dağılımı Tablo 9'da gösterilmiştir.

**Tablo 9.** Alt geçitli turbo kavşak kollarında trafik akımının yönlere dağılımı

Kavşağa Giriş Kolu		Kollardan Kavşağa Giren Trafik Zirve Saatlerde Dağılım Yönleri				
		A	B	C	D	TOPLAM
A:Emniyet İl Müdürlüğü	Dağılım Senaryosu %	26	0	23	51	100
	Taşıt Sayısı	27	0	24	53	104
B:Bingöl Merkez	Dağılım Senaryosu %	54	27	0	18	100
	Taşıt Sayısı	221	111	0	74	406
C:Bingöl Sanayi	Dağılım Senaryosu %	10	80	10	0	100
	Taşıt Sayısı	44	352	44	0	440
D:UyduKent 2019 Yılı 422	Dağılım Senaryosu %	0	72	22	6	100
	Taşıt Sayısı	0	274	84	21	379

Alt geçitli turbo kavşak kolları önünde trafik akımı alt geçitsiz turbo kavşağa ait hesaplamalarına benzer şekilde yapılarak (Tablo 7) kavşak kollarında sağ ve sol şerit doyumluk yüzdeleri Tablo kapasiteleri ve şerit doyumluk yüzdeleri Tablo10'da gösterilmiştir.

**Tablo 10** Altgeçitli turbo, kavşak kollarının kapasiteleri ve şerit doyumluk yüzdeleri

Kavşağa Giriş Kolu	Kavşak Kolunun Sağa Sola Dönüş Kapasiteleri (B.Oto/sa)		Kavşağa Giriş Kolunda Sola ,Karşı Kola ve Sağa Dönen Taşıtların Sayıları (B.Oto/sa)			Kollarda Sağ Şeridi Kullanma Oranı $\rho$ Eşitlik [7,8]	Düzeltilmiş $\rho^*$	İki Şeritli Giriş Kolunda Sağa Sola Dönüş Trafik Alımı (B.Oto/sa)		İki Şeritli Giriş Kolunda Şerit Doyumluğu (%)	
	$C_{sol}$ Eşitlik [4,5,6]	$C_{sağ}$ Eşitlik [4,5,6]	$q_1$	$q_2$	$q_3$			$q_{sağ-sağ}$ Eşit. [10]	$q_{sağ-sol}$ Eşit [9]	$D_{sağ}=q_{sağ-sağ}/C_{sağ}$	$D_{sol}=q_{sağ-sol}/C_{sol}$
A:Emniyet İl Müdürlüğü	647	728	80	24	0	2,294	1,000	24	80	3,30	12,36
B:Bingöl Merkez	1388	1419	332	74	0	2,774	1,000	74	332	5,21	23,93
C:Bingöl Sanayi	1085	1142	396	44	0	5,127	1,000	44	396	3,85	36,50
D:UyduKent	793	865	105	274	0	0,722	0,722	198	181	22,86	22,86

\* $\rho > 1$  ise  $\rho = 1$ ,  $\rho < 0$  ise  $\rho = 0$  alınmıştır [25]

## 6. Sonuçlar

Sinyalizasyonlu olarak hizmet veren Düzağaç kavşağının alt geçitli ve alt geçitsiz sinyalizasyonuz turbo dönel kavşak olarak tasarlanması durumunda;

-Sinyalizasyonsuz turbo kavşakların yaygın olarak kullanılmasını sağlamak için modern dönel kavşaklarda olduğu gibi sürücü bilinçlendirilmesinin sağlanması gerektiği;

-Alt geçitli turbo kavşağın kavşağa giriş kollarında sol şerit doygunluğunun alt geçitsize göre ortalama 2 kat, sağ şerit doygunluğunun ise ortalama 5,50 kat azaltılmasına karşın, bu kavşağın öncesi ve sonrasında bulunan kavşakları olumsuz yönde etkileceği;

-Bingöl Sanayi ve Emniyet Müdürlüğü kollarında taşıt trafiğinin alt geçitle sağlanması durumunda, kavşak kollarının sağ şeritlerinde doygunluk yüzdelerinin düşmesine rağmen Bingöl Sanayi, Bingöl Merkez ve UyduKent kollarının sol şeritlerinde ortalama %25 oranında doygunluk bulunduğuna;

-Bingöl Sanayi, Bingöl Merkez ve UyduKent kollarında trafik artışı olması durumunda sol şeritte doygunluk yüzdesi artacağından; Bingöl Sanayi ve Bingöl Merkez kollarının sola dönüş önceliklerine göre üst geçit gerekeceği;

-UyduKent kolunun imar değişiklikleriyle Bingöl Sanayi koluna bağlantısı sağlanarak kavşağın üç kollu sinyalizasyonsuz rotor tipi turbo kavşak yapılması durumunda kapasite ve güvenliğin artırılacağı;

-Turbo kavşak içerisinde bulunan ayırıcıların karla mücadele sırasında trafik güvenliği ve kapasiteye etkilerinin araştırılması gerektiği tespit edilmiştir.

## Kaynaklar

- [1] The 2018 Colorado Department of Transportation (CODOT) Roadway Design Guide, 2018.176-191. [https://www.codot.gov/business/designsupport/bulletins\\_manuals/cdot-roadway-design-guide-2018/dg18-ch10](https://www.codot.gov/business/designsupport/bulletins_manuals/cdot-roadway-design-guide-2018/dg18-ch10) (13.12.2019)
- [2] The Highway Design Manual Guide, 2012. 9: 123. <https://www.oregon.gov/ODOT/Engineering/Pages/Hwy-Design-Manual.aspx>, (16.12.2019).
- [3] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Tasarım El Kitabı. 2008.101-151.
- [4] Mathew, V, Krishan R, Traffic Intersections, 2007. 1-6
- [5] <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/105101087/downloads/Lec-39.pdf>, (16.01.2020).
- [6] <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Trafik>, (16.01.2020).
- [7] Arıkan Öztürk E, Çubuk K, Hatipoğlu S, Aslan D. Modern Dönel Kavşakların Kapasite ve Güvenlik Yönünden İncelenmesi Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 2007. Cilt 22, No 4. 917-925
- [8] Gallelli V, Iuelea T, Vaiana R. Conversion of a semi-two lanes roundabout into a turbo-roundabout:a performance comparison The 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologie ANT, 2016.393-400.
- [9] Evaa P, Andreaa K. Case study: capacity characteristics comparison of single-lane roundabout and turbo-roundabouts. Transcom International scientific conference on sustainable, modern and safe transport, 2017. 703- 706.
- [10] Skvaina V, Petrua J, Krivdaa V. Turbo roundabouts and their Basic Evaluation at Realized Constructions in Czech Republic. Structural and Physical Aspects of Construction Engineering, 2017. 283–290.
- [11] Pilko H, Majcan D. Turbo Roundabouts: Case Study of Croatia Transport Logistics Digital Age, International Scientific Conference Science And Traffic Development, 2018. 221-229.
- [12] Bastos A, Luis Vasconcelos S, Santosa S. Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-Roundabouts, 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, 2013. 2-9.
- [13] Bastos A, Santos S, Gaspar M. Turbo-Roundabout Use And Design CITTA, 6th Annual Conference on Planning Research Responsive Transports ForSmart Mobility, 2015. 3-12.
- [14] Izadi A, Mirzaiyan D. Comparing Traffic Performances Turbo-Roundabouts and Conventional Roundabout (Case Study), The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication TOJDAC, 2016. 2-7.
- [15] Guerrieri M, Corriere F. An International Review One and Two Level Innovative Unconventional Intersection and Interchange ARPN, Journal of Engineering and Applied Sciences.2013. 12,1059-1070.
- [16] Tollazzi T, Rencelj M. Modern and alternative types of roundabouts–state of the art, The 9th International Conference Environmental Engineering, 2014. 2-6.
- [17] Tollazzi T, Mauro R, Guerrieri M, Rencelj, M. Comparative Analysis of Four New Alternative Types of Roundabouts:Turbo, Flower, Target and Four-Flyover Roundabout, Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2016. 51-60.
- [18] Džambas T, Ahac S, Dragčević V. Geometric Design of Turbo-Roundabouts. Technical Gazette, 2017. 309-318 (Print).
- [19] Gredoska N, Bombol K, Nechoska, D. An Evaluation of Turbo-Roundabouts Performance:Case Study of the City Ohrid,2016. 2-7. <https://trid.trb.org/view/1417701>, (16.01.2020).
- [20] Ersoy M, Çelikoğlu H.B. Capacity Analysis on Multi Lane Roundabout: An Evaluation With Highway Capacity Manual 2010 Model, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2014. 20, 225-226.

- [21] Vasconcelos L, Seco A, Silva A, Abreu T, Comparison of Roundabout Capacity Models. The IASTED International Conference on Modelling, Simulation and Optimization 2012. 1-6.
- [22] Tumminello M. Calibration of microscopic traffic simulation models for evaluating operation and safety performance at roundabouts, PhD Thesis, University Palermo, 2018.
- [23] Vasconcelas A, Silva A. Capacity of Normal and Turbo-Roundabouts Comparative Analysis, ICE Institution on of Civil Engineers, 2012. 1-12.
- [24] Mallela J, Suri S. Work Zone Road Users Costs Concepts And Applications, Federal Highway Administration FHWA, 2011. 28-32.
- [25] 2015 yılı devlet yolları trafik hacim haritası (YOGT), kgm.gov.tr Site Collection Documents KGM documents trafik hacim haritası 2015 hacim haritaları 8. Bölge, (10.12.2019).
- [26] Kociánová A. Capacity Limits of Basic Turbo-Roundabouts, <http://komunikacie.uniza.sk/index.php/communications/article/view/294>, (16.12.2019).



## TOPSIS ve MAUT Yöntemleri ile İçmesuyu Dağıtım Sistemlerinde Rehabilitasyon Önceliğinin Belirlenmesi

Şeymanur GÜL<sup>1</sup>, Mahmut FIRAT<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

<sup>1</sup> seyma4417@gmail.com, <sup>2</sup> mahmut.firat@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 19/02/2020;

Kabul/Accepted: 08/11/2020)

**Öz:** İçmesuyu dağıtım sistemlerinde meydana gelen arızaların sıklığının artmasına bağlı olarak hizmet kalitesi düşmekte ve işletme maliyetleri artmaktadır. Bu nedenle İçmesuyu dağıtım sistemlerinde risk değerlendirmesi, şebeke rehabilitasyon programının oluşturulması ve varlık yönetimi kapsamında analiz ve değerlendirmelerin yapılması sistem yönetimi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışma kapsamında, çoklu ölçütlü karar verme yöntemleri ile içmesuyu dağıtım sistemlerinde şebeke rehabilitasyonunda öncelikli bölgelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, öncelikle literatür incelemesi yapılarak verisi ölçülebilir, uygun, karşılaştırılabilir ölçütler çerçevesinde toplam 28 faktör belirlenmiştir. Belirlenen bu faktörlerin etki derecesini belirlemek ve ağırlıkları hesaplanmak için ENTROPI yöntemi uygulanmıştır. Hesaplanan ağırlık katsayılarının problemin doğal yapısı ile uyumlu olduğu görülmüştür. Faktörlere ait ağırlıklar ve saha verileri kullanılarak Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) ve Multi-attribute utility theory (MAUT) yöntemleri ile ayrı ayrı analiz yapılmış, öncelik sıralaması yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmelerde her iki yöntem ile belirlenen bölgelerin benzer olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** İçmesuyu dağıtım sistemi, rehabilitasyon, çoklu ölçütlü karar verme

### Identification of Rehabilitation Priority in Water Distribution Systems by TOPSIS and MAUT Methods

**Abstract:** Due to the increase in the frequency of failures and leakages in water distribution systems, service quality decreases and operating costs increase. Therefore, risk assessment in water distribution systems, establishment of network rehabilitation program and analysis and evaluations within the scope of asset management are very important for system management. In this study, it is aimed to determine the priority regions in network rehabilitation in drinking water distribution systems with multi-criteria decision making methods. For this purpose, a total of 28 factors were determined within the framework of appropriate, comparable criteria whose data can be measured by first making a literature review. ENTROPY method was applied to determine the effect degree of these factors and to calculate their weights. The calculated weight coefficients were found to be compatible with the natural structure of the problem. Weights were analyzed separately using TOPSIS and MAUT methods using weights and field data, priority rankings were made and results were evaluated. In the evaluations made, it was seen that the regions determined by both methods are similar.

**Key words:** Water distribution system, rehabilitation, multi criteria decision making

### Giriş

İçmesuyu dağıtım sistemlerinde meydana gelen arıza sıklığına bağlı olarak işletme maliyeti artmakta ve abonelere sunulan hizmet kalitesi azalmaktadır. Ayrıca arıza sıklığının artmasına bağlı olarak sokak bazlı boru değiştirme oranları da artmaktadır. Bu nedenle bu tür sistemlerde “şebeke yenileme” veya “sokak bazlı onarım” stratejileri arasında tercih yapmak gerekmektedir. Buna karar vermek için sistemin fiziksel özellikleri, işletme maliyeti, arıza ve sızıntı oranları gibi birçok faktör göz önünde bulundurulmalı ve analiz yapılmalıdır. Son yıllarda şebeke rehabilitasyonu, arıza oranının tahmini ve ekonomik analiz çerçevesinde çeşitli yöntemler kullanılarak çalışmaların yapıldığı görülmektedir [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Fares [9] tarafından yapılan çalışmada, Kanada’da içme suyu şebekelerinde arızaların risk durumunun değerlendirilmesi, içme suyu şebekesinin korunması için yönetim stratejilerinin uygulanması, maddi ve fiziksel hasarların önlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, risk kaynakları 5 grupta incelenmiş olup, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Hiyerarşik bulanık uzman sistem ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) modeli uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda sistemi etkileyen en yüksek risk faktörünün boru yaşı olduğu saptanmıştır. Sargaonkar vd. [10] yaptığı çalışmada Hindistan’ın Hyderabad kentinde kötü durumdaki kritik boruları belirlemek, kent nüfusuna sürekli ve güvenli su

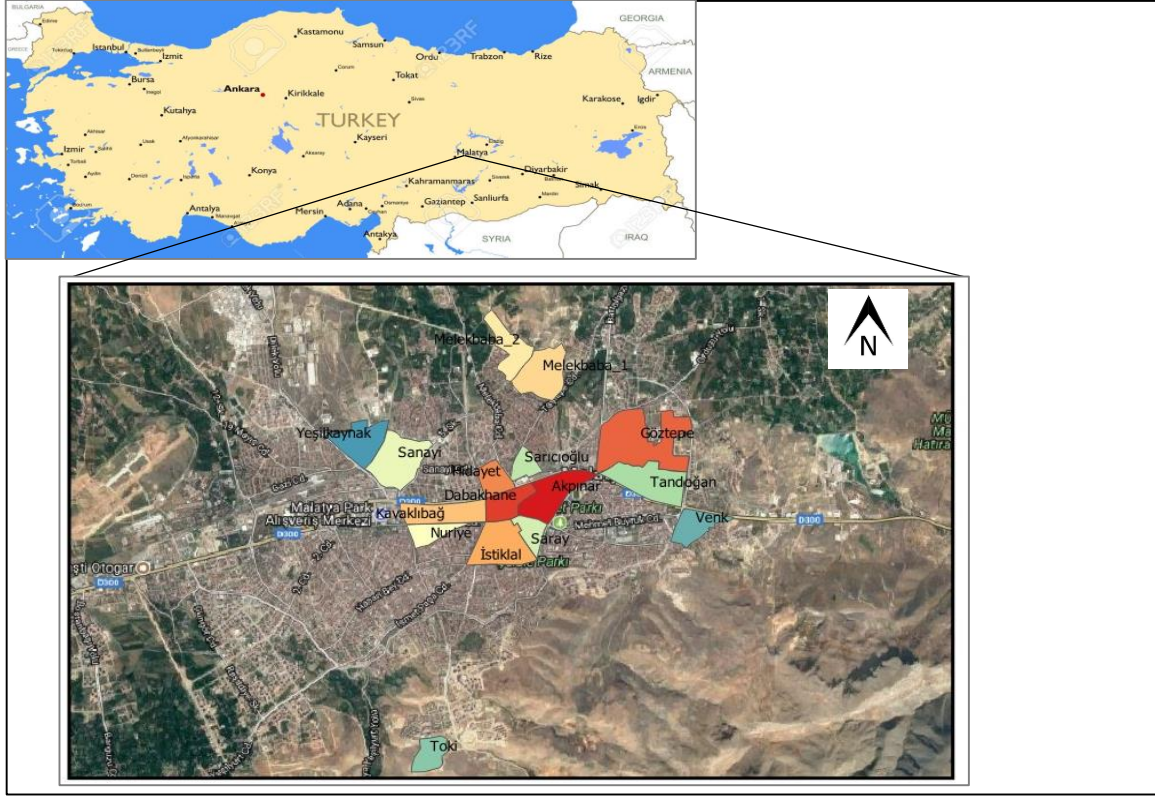
\* Sorumlu yazar: [mahmut.firat@inonu.edu.tr](mailto:mahmut.firat@inonu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-3773-9058, <sup>2</sup>0000-0002-8010-9289

temini sağlamak amacıyla su ve kanalizasyon şebekesi, toprak ve yeraltı suyu CBS haritalarını hazırlamış ve yüksek riskli bölgeler belirlemiştir. Francisque vd. [11] bulanık sentetik değerlendirme, analitik hiyerarşi süreç ve bulanık kümeleme yöntemleriyle su şebekesinde güvenlik açığı, duyarlılık ve risk indekslerinin belirlenmesini amaçlamıştır. Çalışmada, metal borularda korozyona bağlı zararlar ortaya çıkabileceği ve su sıcaklığının artışı bozulmalara sebep olabileceği vurgulanmıştır. Morais ve Almeida [12] kesintisiz, uygun basınçta, kaliteli su temini sağlamak amacıyla Preference ranking organization method for enrichment evaluation (PROMETHEE) yöntemini kullanarak en iyi alternatiflerin alt kümelerini belirlemiş ve sıralamıştır. Roozbahani vd. [13] kentsel su temini yönetiminde karşılaşılan sorunlar için farklı karar verme yöntemlerinin oluşturulması, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla PROMETHEE I, PROMETHEE II, PROMETHEE-GAIA, PROMETHEE-GDSS metotlarını uygulamıştır. Francisque vd. [14] tarafından yapılan çalışmada Kelowna şehrinin içme suyu dağıtım sistemi incelenmiştir. Su şebekelerinde bakım onarım yenileme strateji önceliğinin sağlanması, metalik, çimento, plastik, AC boruların karşılaştırılması, olası sistem arızalarının belirlenmesi, sudaki klor miktarının optimize edilmesi, su kalitesinin artırılması hedeflenmiştir. Scholten vd. [15] su dağıtım şebekelerinin stratejik varlık yönetiminde gelecekteki belirsizlikler altında 18 stratejik rehabilitasyon alternatiflerinin değerlendirilmesi için bir çerçeve oluşturulmuştur. Çok kriterli karar analizi, ELimination Et Choice Translating REality (ELECTRE), Varlık Yönetim Yazılımı uygulanmıştır. Alternatifler karşılaştırılmış, sıralanmış ve Boom senaryosu altında duyarlılık analizi yapılmıştır. Marzouk vd. [16] (2015) yaptıkları çalışmada su dağıtım sistemlerinin performansını iyileştirmek, rehabilitasyon teknolojisinin seçimini tanımlamak amacıyla SIMOS algoritmasını uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda karar vericiler için hızlı onarım, karar ve yenileme adımı sağlamak, ARC-MAP ile görselleştirme sağlamak, yaşam döngü maliyetleri ve risklerini minimize etmek hedeflenmiştir. Literatürde incelenen çalışmalardan da görüldüğü üzere, içmesuyu dağıtım sistemlerinde risk değerlendirmesi, şebeke rehabilitasyon programının oluşturulması ve varlık yönetimi gibi alanlarda farklı yöntemler kullanılarak analiz ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, çoklu ölçütlü karar verme yöntemleri ile içmesuyu dağıtım sistemlerinde şebeke rehabilitasyonunda öncelikli bölgelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, faktörlere ait ağırlıkların hesaplanmasında ENTROPI yöntemi uygulanmıştır. Faktörlere ait ağırlıklar ve saha verileri kullanılarak TOPSIS ve MAUT yöntemi ile öncelik sıralaması yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar için Malatya merkez içmesuyu dağıtım sisteminde 16 bölge uygulama alanı olarak belirlenmiştir.

## 2. Çalışma Alanı ve Veri

### 2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışmada Malatya ili uygulama alanı olarak seçilmiş olup nüfusu 780.000 kişi ve yüzölçümü 12.313 km<sup>2</sup>'dir. Yerleşim, genel olarak şehrin kuzeyinde deniz seviyesinden 690 metre yukarıda olan Karakaya Baraj Gölü kıyıları ile şehrin güneyinde bulunan Beydağının eteklerinde yaklaşık olarak 1200 metre kotları arasında yayılmıştır. Yoğun yerleşimin olduğu bölge ise 900 metre kotlarındadır. Malatya ili metropol bölgesine verilen suyun çok büyük bir bölümü şehrin güneyindeki Beydağlarında deniz seviyesinden 1205 m yukarıda bulunan ve şehrin nerdeyse tamamına cazibe ile su iletme imkanı sunan Pınarbaşı Kaptaj sahasından sağlanmaktadır. İçme suyu şebekesinde kullanılan boru tipleri 2014 yılına kadar AÇB boru, PVC boru, Font Boru, Çelik Boru ve Polietilen borulardır. Malatya Su ve Kanal İdaresi 2014 yılından sonra bahsi geçen boru tiplerini kullanmayı bırakmış ve ağırlıklı olarak Duktıl borular kullanılmaya başlanmıştır (MASKİ, 2018). Malatya ilinin güneyindeki yükseltileri oluşturan jeolojik yapılar Doğu Torosların kolu olup yaşlı kayaçlardan oluşmaktadır. Güneybatıdan doğu yönüne doğru uzanan paleozoyik yaşlı metamorfik şistler ve mermer yapılı kireçtaşları bölgedeki en yaşlı kayaçlardır (MASKİ, 2018). Uygulama alanında Su İdaresi şebeke borusu değiştirilmeden sınırları diğer şebeke elemanlarından izole edilmiş 16 İzole Alt Ölçüm Bölge (DMA) oluşturulmuş ve bu çalışma için 16 DMA seçilmiştir [17] (Şekil 1). İzole bölge, su dağıtım şebekesini daha kolay kontrol edebilmek amacıyla birbirinden bağımsız küçük su dağıtım şebekelerine bölünerek oluşturulan su dağıtım şebekeleridir.



Şekil 1. Uygulama alanı ve izole bölgeler [17,18]

## 2.2. Faktörler ve Veri Matrisi

Bu çalışma kapsamında şebeke rehabilitasyonunda öncelikli bölgelerin belirlenmesi amacıyla ilk olarak problem ile ilgili faktörlerin belirlenmesidir. Etkili faktörler için ağırlık katsayıları hesaplanarak bu faktörlerin önem dereceleri belirlenecektir. Literatürde, arıza ve su kayıp analizi ve boru hasarlarının modellenmesi konularındaki çalışmalar incelenmiş ve 156 farklı değişkenin kullanıldığı gözlenmiştir. Ancak bu kadar fazla değişkenin kullanılması, problemin karmaşıklığını arttıracak, verilerin toplanmasında güçlük yaşanacaktır. Bu nedenle bu çalışmada sistemin mevcut performansını belirlemek ve karar modeli kurmak için uygulanabilirlik, anlaşılabilirlik, ölçülebilirlik, karşılaştırılabilirlik kriterli göz önüne alınarak değişken sayısı 28'e düşürülmüştür [17] (Tablo 1). *Uygulanabilirlik ölçütü*, çalışmada kullanılacak değişkenlerin, modelin geliştirilmesi ve uygulanmasında uygulanabilir olup olmadığının sorgulanması ve bu değişkenlerin fiziksel, çevresel ve işletme parametreleriyle olan ilişkisinin değerlendirilmesini kapsamaktadır. *Anlaşılabilirlik ölçütü*, değişkenlerin karar vericiler ve uygulayıcılar tarafından anlaşılabilir olmasını kapsamaktadır. *Ölçülebilirlik ölçütü*, değişkenlerin ne kadarının kullanılabilir, ulaşılan verilerin ne kadarının sıklıkla ölçülebilir olduğunu ifade etmektedir. *Karşılaştırılabilirlik ölçütü*, değişkenlerin ne kadarının farklı bölgelerde kıyaslanabilir olduğunu açıklamaktadır. Kısaca, modelde kullanılacak değişkenlerin verisinin toplanabilir, ölçülebilir olması, modelin başka bölgelere uygulanabilir olması, bölgelerin bir biri ile kıyaslanabilir olması göz önünde bulundurulmuştur. Burada en önemli nokta, değişkenlerin verilerinin düzenli ve doğru bir şekilde tutuluyor olması gösterilebilir. Verisi düzenli tutulmayan değişkenlerin sisteme dahil edilmesi karmaşıklığı arttırdığı gibi uygulanabilirliği de kısıtlamaktadır. Tabloda, az yoğun trafik 1 olarak; çok yoğun trafik ise 2 olarak ölçeklendirilmiştir. Bölgelerin zemin özellikleri incelenerek arazi tipine göre hareketli ve ortalama zemin olarak ikiye ayrılmış ve ortalama zemin yükü 1; hareketli zemin ise 2 olarak ölçeklendirilmiştir [16]. Merkez ilçelerinde seçilen bu bölgelere ait veriler ve haritalar MASKİ CBS ortamında elde edilmiştir (Tablo 2 ve 3) [17, 18].



**Tablo 1.** Çalışmada göz önüne alınan değişkenler [17]

<b>Değişkenler</b>	<b>Açıklama</b>
Toplam şebeke uzunluğu (m) (D1)	Şebeke uzunluğuna bağlı olarak bağlantı sayısı, arıza oranı artmakta ve sistem yenileme maliyeti yüksek olmaktadır.
PVC (%) (D2)	Boru malzemesinin uygun seçilmesi sistemin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Boru tercihi yapılırken, borunun ekonomik olmasının yanında uzun ömürlü, dayanıklı, bakım, onarım ve montaj kolay olmalıdır.
AÇB (%) (D3)	
Boru çapı <100 (mm) (D4)	Boru çapı, enerji kayıp katsayısını doğrudan etkilemektedir. Boru çapının uygun seçilmemesi durumunda boruda oluşan basınç kaybını artırır ve tesisatın ömrünü kısaltır.
Boru çapı 100 -250 mm (D5)	
Boru çapı >250 mm (D6)	
Şebeke arıza sayısı (D7)	Şebeke ve servis bağlantılarındaki arızalar, dağıtım sisteminin yapısal ve hidrolik kapasitesinin azalmasına neden olur. Boruların kırılması, çatlaması, su akışının kesilmesi gibi arızaya sebep olan etkenler bir sistemi verimsiz hale getirmektedir. Şebekede meydana gelen arızaların tespiti, rehabilitasyon için öncelikli bir parametredir. Rapor edilmeyen sızıntılar, yüzeye çıkmadığı için sahada tespit edilmediği sürece büyük oranda su kaybı yaşanmakta ve bakım-onarım-işletme maliyeti artmaktadır.
Şebeke arıza oranı (arıza/yıl/km) (D8)	
Servis bağlantı arıza sayısı (D9)	
Servis bağlantı arıza oranı (arıza/yıl/km) (D10)	
Abone sayısı (D11)	
Sızıntı miktarı (D12)	
20 yaşından büyük boru oranı (%) (D13)	Boru yaşı sistemde arızalar üzerinde etkili en önemli faktörlerden biri olup eski borulardaki kırıklar, arızalar sistemi olumsuz yönde etkilemektedir.
Servis bağlantısı sayısı (D14)	Servis bağlantılarında şebekede bulunan boru cinsine uygun olan bağlantı yapılmaktadır. Arızaların önemli bir kısmı servis bağlantılarında gözlenmekte ve işletme maliyeti üzerinde etkilidir.
Yıllık su kesintisi sayısı (D15)	Suyun tüketiciye kaliteli ve verimli bir şekilde ulaştırılması gerekmektedir. Bir bölgede meydana gelen su kesintilerinin sayısının fazla olması, hizmet kalitesini düşürmekte ve işletme koşullarını bozmaktadır.
Arazi durumu (D16)	Boru montajına, hendek kazısına ve dolgu malzemesinin sıkıştırılması gibi imalat işlerinde gerekli özen gösterilmezse boru hattında patlamalar yaşanır. Bu sebeplerden ötürü çalışılan bölgelerin arazi yapısı bilinmelidir.
Zemin ve toprak özelliği (D17)	Bölgenin zemin özelliğini temsil eder.
Sokak sınıfı (<20 m ve >20 m %oranları) (D18)	Bölgede boruların hizmet verdiği sokak genişliğini ifade eder.
Önemli yapılar ( hastane, okul) (D18)	Bölgedeki hastaneler, okullar, alışveriş merkezleri vb. su tüketim oranını büyük ölçüde arttırmaktadır. Bu yapıların olduğu bölgelerde su kesintisinin en az olması önemlidir.
Trafik yoğunluğu (D20)	Boru üzerinde meydana gelebilecek hasarlarda etkili olan bir parametredir. Boru çatlakları ve ezilmeleri ve arızaları önemli ölçüde etkilemektedir.
Değiştirilmiş boru yüzdesi (%) (D21)	Arızaya bağlı olarak sokakta değiştirilen boru oranını temsil eder.
Bilinen vana sayısı (D22)	Vanalar sistemin arıza durumunda boşaltılmasına yardımcı olan şebekenin emniyetli çalışmasını sağlayan elemanlardan biridir. İçme suyu dağıtım sistemlerinde, alt ölçüm bölgelerini ayırmak, işletme sırasında bakım ve onarım amaçlı bölgesel tecrit oluşturmada vanaların bilinmesi önemlidir.
İşletme basıncı (D23)	Sistemdeki basınç dalgalanmaları ve değişimleri, boru hasarlarına neden olur, aşırı şebeke basıncı da sistemi olumsuz etkilemektedir.
Su Kayıp Oranı (%) (D24)	Su kayıpları, sızıntılarından, kaçak bağlantılardan ve sayaç hatalarından kaynaklanır. Sistem işletme ve su üretim maliyeti üzerinde etkilidir.
İşletme maliyeti (TL/yıl) (D25)	Sistemde meydana gelen arızalar, işletme maliyeti üzerinde etkilidir.
Nüfus (D26)	Hizmet edilen nüfusu temsil eder.
Bölgenin toplam su talebi m <sup>3</sup> /yıl (D27)	Su talebi, belirli bir zaman periyodu içinde belli bir nüfusun ihtiyaç duyduğu su miktarını ifade eder. Alt ölçüm bölgelerde uygun rehabilitasyon yöntemleri ile su kayıpları azaltılabilir.
Bölgenin su talebi l/kişi*gün (D28)	

**Tablo 2.** Bölgelerde faktörlere ait veriler [17,18]

BÖLGE No ve ADI	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	
DMA 1	Hidayet	4350	72.4	22.1	0.66	94.53	4.81	70	1.61	207	4.76	1405	10	78.5
DMA 2	Sarıcıoğlu	7543	61.3	20.7	0.45	67.67	31.88	63	0.84	78	1.03	1321	14	62.8
DMA 3	Saray	7991	83.5	2.9	0.76	86.43	12.81	148	1.85	112	1.40	2515	8	85.3
DMA 4	Kavaklıbağ	6705	74.8	19.6	1.68	89.43	8.89	228	3.40	37	0.55	2832	36	54.0
DMA 5	Dabakhane	9710	43.7	29.6	2.81	55.84	41.35	221	2.28	91	0.94	2872	44	76.4
DMA 6	Toki	27383	46.1	17.3	15.97	72.85	11.20	7	0.03	28	0.10	1565	0.1	83.0
DMA 7	Yeşilkaynak	29778	83.5	14.1	0.78	96.10	3.12	128	0.43	54	0.18	770	7	75.3
DMA 8	Akpınar	19798	71.2	20.2	10.90	82.74	6.37	336	1.70	54	0.27	4507	29	67.9
DMA 9	Nuriye	13205	57.5	25.1	0.23	76.29	23.47	194	1.47	44	0.33	2446	6	51.7
DMA 10	Venk	5004	87.3	2.9	1.94	95.04	3.02	98	1.96	91	0.10	1282	0.1	85.7
DMA 11	İstiklal	14825	46.4	17.0	14.05	74.13	11.81	339	2.29	137	0.92	5655	35	87.0
DMA 12	Tandoğan	2739	0.1	0.1	1.24	98.76	0.10	181	6.61	184	6.72	2382	21	0.1
DMA 13	Göztepe	13386	72.2	16.1	1.38	88.32	10.29	330	2.47	159	1.19	2836	20	80.1
DMA 14	Sanayi	19543	31.1	7.6	10.50	61.73	27.78	210	1.07	76	0.39	1510	36	32.3
DMA 15	Melekbaba1	19122	74.7	11.7	1.74	96.85	1.41	93	0.49	190	0.99	1183	2	53.8
DMA 16	Melekbaba2	22775	55.9	14.3	15.91	76.44	7.65	102	0.45	190	0.83	604	4	77.6

**Tablo 3.** Bölgelerde faktörlere ait veriler [17,18]

BÖLGE	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21	D22	D23	D24	D25	D26	D27	D28
DMA 1	301	12	0.9	2	1.6	3	2	8	12	55	33.29	48054	6565	160358	66.9
DMA 2	315	10	1.2	2	0.75	1	1	5	23	52	76.27	50154	4121	136660	90.9
DMA 3	454	8	2.4	2	0.85	3	1	4	23	58	45.29	72389	2883	137149	130.3
DMA 4	522	18	2.5	2	1.39	6	2	17	27	42	39	83433	988	8.645	24.0
DMA 5	510	3	1.6	2	1.07	1	1	3	14	51	36.87	81349	3391	300900	88.7
DMA 6	380	26	0.1	1	1.49	4	2	15	32	40	30.57	4.06	10457	321888	84.3
DMA 7	537	73	2.9	2	0.96	1	2	20	27	62	56.22	85343	2506	80668	88.2
DMA 8	678	7	2.1	2	0.75	5	1	14	21	58	34.69	107935	1683	250.359	407.6
DMA 9	384	10	3.8	2	1.07	2	1	15	24	41	35.42	61212	2927	262174	245.4
DMA 10	527	28	5	1	0.85	4	2	25	37	44	32.79	310	21186	1127945	145.9
DMA 11	1179	6	3.5	2	0.75	6	1	2	74	41	56.44	187588	5241	282987	147.9
DMA 12	829	48	2.6	2	0.75	1	1	45	72	46	32.81	132694	8440	458237	148.7
DMA 13	1467	37	3.8	2	0.85	5	2	10	65	59	53.69	233351	9207	376041	111.9
DMA 14	1054	22	1.6	2	0.85	1	1	15	28	56	57.24	167545	3545	331341	256.1
DMA 15	949	19	6.6	1	0.96	4	1	25	40	43	68.29	150778	5204	202057	106.4
DMA 16	575	36	4.3	1	1.07	1	1	5	10	45	68.29	91381	6928	202057	79.9

### 3. Yöntem

#### 3.1. Topsis Yöntemi

TOPSIS yöntemi, ELECTRE yönteminin temel yaklaşımlarını kullanarak Hwang ve Yoon [19] tarafından oluşturulmuştur. Pozitif ideal çözüme en yakın olarak belirlenen alternatif, negatif ideal çözüme de en uzak alternatif olarak bulunmaktadır [20]. Alternatifler içinden pozitif ideal çözüme yakın, negatif ideal çözüme uzak olanı seçilmektedir. Bu yöntemin uygulanmasında öncelikle karar matrisinin (A) oluşturulması gerekmektedir (denklem 1).

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Normalize karar matrisinin (X) her bir elemanını hesaplamak için, A matrisinin her bir elemanı, o elemanın bulunduğu sütun değerlerinin kareleri toplamının kareköküne bölünür. Bu adımda bir karar noktası ilgili değerlendirme kriteri, diğer karar noktalarıyla beraber ilişkilendirilir (denklem (2) ve (3)). Normalize karar matrisinin her bir sütunundaki kriterler, o sütundaki ağırlıklarla çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize matris elde edilir (denklem 4).

$$X_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n r_{ij}^2}} \quad i=1,2,\dots,m \ ; \ j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$X_{ij} = \frac{1/r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n 1/r_{ij}^2}} \quad i=1,2,\dots,m \ ; \ j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} * W_1 & \dots & X_{1n} * W_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} * W_1 & \dots & X_{mn} * W_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

İdeal çözüm setinin ( $A^*$ ) oluşturulması için en büyük yapma amaçlanmışsa Y matrisindeki ağırlıklandırılmış sütun değerlerinden en büyük olanı seçilir (denklem (5)). Negatif ideal çözüm seti ( $A^-$ ), oluşturulabilmesi için en düşük yapma amaçlanmışsa Y matrisindeki ağırlıklandırılmış sütun değerlerinin en küçükleri seçilir.

$$A^* = \left\{ (\max_i v_{ij} | j \in J), (\min_i v_{ij} | j \in J') \right\} \quad (5)$$

$$A^- = \left\{ (\min_i v_{ij} | j \in J), (\max_i v_{ij} | j \in J') \right\} \quad (6)$$

Bu denklemde, J fayda faktörünü, J' ise maliyet faktörünü ifade eder, bulunması amaçlanan setler ise  $A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}$  ve  $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$  şeklinde gösterilmektedir. Karar noktalarına ait değerlendirme faktörü değerlerinin ideal ( $S_i^*$ ) ve negatif ideal çözüm ( $S_i^-$ ) kümesinden sapmalarının hesaplanabilmesi için Euclidian uzaklık yaklaşımından faydalanılır. Her bir karar vermede belirlenen alternatifin ideal çözüme göreli yakınlığının ( $C_i^*$ ) hesaplanması için ideal ve negatif ideal ayırım ölçütleri kullanılır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (8)$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (9)$$

$C_i^*$  değeri  $0 \leq C_i^* \leq 1$  aralığındaki değerleri içermektedir.  $C_i^* = 1$  hesaplanan alternatifin ideal çözüme,  $C_i^* = 0$  alternatifin negatif ideal çözüme olan mutlak yakınlığı belirtilmektedir. Alternatifler ideal çözüme göreli yakınlık ( $C_i^*$ ) değerine göre sıralanmaktadır.

### 3.2. Maut Yöntemi

Çok ölçütlü karar verme metodlarından MAUT yöntemi, Fishburn [21] ve Keeney [22] tarafından oluşturulmuş ve Loken [23] tarafından geliştirilmiştir. MAUT yöntemi, belirlenen alternatifler arasında bir sıralama oluşturmak amacıyla sistematik şekilde çalışmaktadır. Bu yöntemde karar verme problemine ait faktörler ve alternatifler karar vericiler tarafından belirlenir. Karar matrisinin satırlarında alternatifler, sütunlarında ise faktörler yer almaktadır. Bir önceki adımda belirlenen değerler karar matrisi yardımıyla normalize edilmektedir. Bunun için her alternatif için, en iyi alternatif için 1, en kötü alternatif için 0 atanır (denklem 11) kullanılır. Normalizasyon işleminden sonra fayda değerlerinin belirlenmesi için fayda fonksiyonu kullanılır (denklem 12).

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$u_i(x_i) = \frac{x - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (11)$$

$$U(x) = \sum_{i=1}^m u_i(x_i) * w_j \quad (12)$$

$x_i^+$ ; alternatif için en iyi değer,  $x_i^-$ ; alternatif için en kötü değer,  $x$ ; hesaplanan satırdaki mevcut fayda,  $Ux$ ; alternatifin fayda,  $u_i(x_i)$ ; her kriter ve her alternatif için normalize fayda,  $w_j$ ; ağırlık değeridir.

### 3.3. Entropi Yöntemi

Bu çalışmada faktör ağırlıklarının belirlenmesinde ENTROPI yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem çok ölçütlü karar verme yöntemi olup faktörlerin ağırlıklarını saha verileri esas alınarak belirlemektedir. Faktör ağırlıklarının hesabında ENTROPI olarak ifade edilen performans puanları elde edilmekte ve bu puanların ne kadar farklılaşmış olduğu prensibine göre belirlenmektedir [24]. Ağırlıkların hesabı için karar matrisi oluşturulmakta ve bu matrisin satırlarında alternatifler yer alırken sütunlarda ise probleme ait faktörler bulunmaktadır (denklem 13). Bu veri matrisi, denklem (14) ile normalizasyon işlemi ve denklem (15) ile de Entropi hesabı gerçekleştirilir [24]. Bu yöntemde bu aşamada  $d_j$  belirsizliği eşitlik (16) yardımıyla ve ağırlıklar ise denklem (17) ile hesaplanır [24].

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

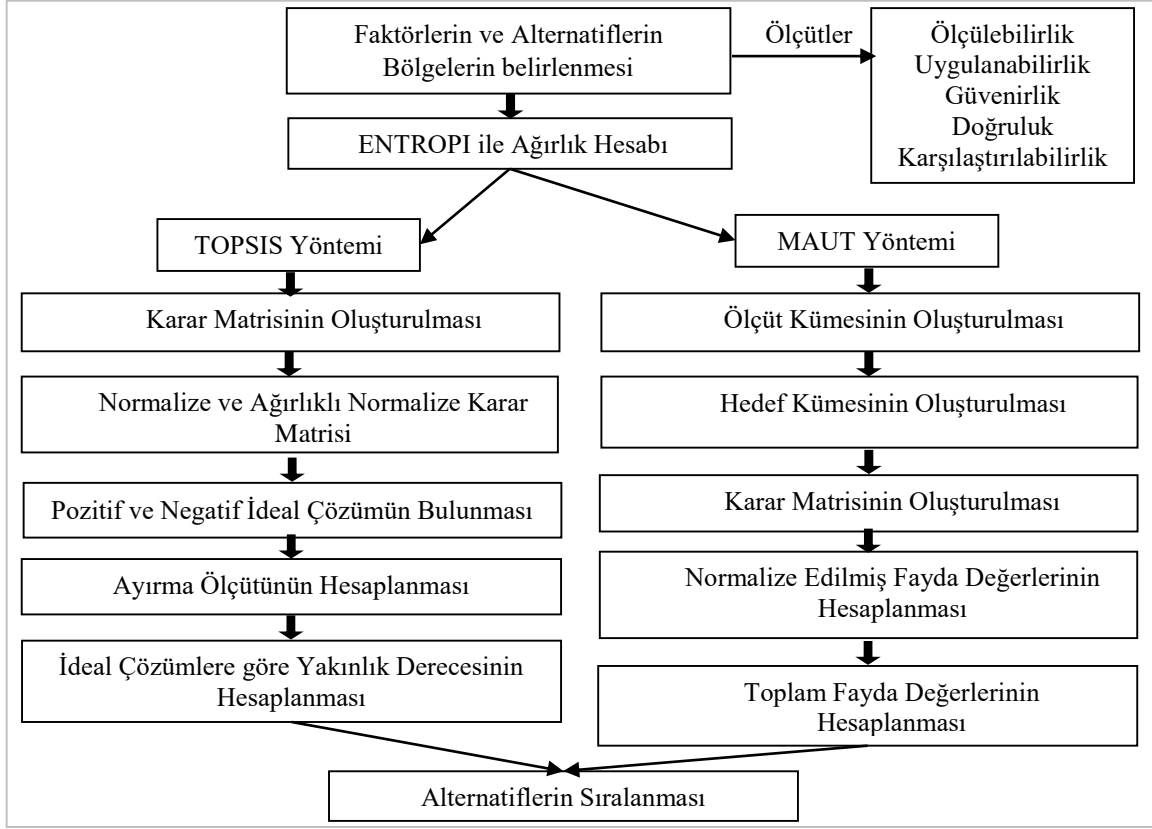
$$rij = (x_{ij} - \min_j x_j) - (\max_j x_j - \min_j x_j) \quad (14)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m rij * (\ln(rij)) \quad (15)$$

$$d_j = 1 - E_j ; \forall j \quad (i = 1 \dots, m; j = 1, \dots, n) \quad (16)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}; \forall j \quad (17)$$

$k$ ; ENTROPI katsayısı ( $k = (\ln(n)) - 1$ ),  $rij$ ; normalize edilmiş değerler,  $E_j$ ; ENTROPI değeri,  $i$ ; alternatifler,  $j$ ; kriterler,  $rij$ ; normalize edilmiş değer,  $x_{ij}$ ;  $i$ . alternatif  $j$ . kriter için verilen fayda değerleridir.



Şekil 2. Akış diyagramı [17]

#### 4. Analiz ve Değerlendirme

##### 4.1. Ağırlıkların Hesabı

Şebeke rehabilitasyonunda öncelikli bölgelerin belirlenmesinde ilk önce ENTROPI yöntemi ile ağırlık katsayıları hesaplanmıştır. Ağırlık katsayılarının hesabında faktörlere ait veriler (Tablo 4) dikkate alınmıştır. Dağıtım sistemlerinde işletme maliyetini arttıran en önemli bileşenler yüzeye çıkan ve çıkmayan arıza ve sızıntıların bakım-onarım ve tespit çalışmaları gösterilebilir. Bunların sayısının ve sıklığının artmasına bağlı olarak işletme maliyeti artmakta ve hizmet kalitesi de düşmektedir.

Tablo 4. Faktör ağırlıkları [17]

Faktör	Ağırlık	Faktör	Ağırlık	Faktör	Ağırlık	Faktör	Ağırlık
D1	0.0298	D8	0.0536	D15	0.0489	D22	0.0277
D2	0.0169	D9	0.0266	D16	0.0304	D23	0.0019
D3	0.0317	D10	0.1095	D17	0.0059	D24	0.0120
D4	0.1071	D11	0.0274	D18	0.0056	D25	0.0420
D5	0.0022	D12	0.0677	D19	0.0409	D26	0.0446
D6	0.0663	D13	0.0157	D20	0.0103	D27	0.0477
D7	0.0311	D14	0.0192	D21	0.04511	D28	0.0315

Tabloda verilen sonuçlar incelendiğinde, en yüksek ağırlık katsayılarının, Tespit edilen sızıntı miktarı, şebeke ve servis bağlantı yüzeye çıkan arıza sayıları, bölgede değiştirilmiş boru yüzdesi faktörleri için hesaplandığı görülmektedir. Bölgede değiştirilmiş boru yüzdesi, arıza oranına bağlı olarak sokak bazlı boru değiştirme oranını gösterdiği için arızanın sık gözlemlendiği bölgelerde boru değiştirme oranı yükselecek ve dolayısıyla da sistem maliyeti artacaktır. Rapor edilmeyen sızıntıların fazla olduğu sistemlerde, şebekenin izlenmesi, sızıntının tespit edilmesi ve onarılması gibi önemli maliyet kalemleri ortaya çıkmakta ve bu sızıntılar

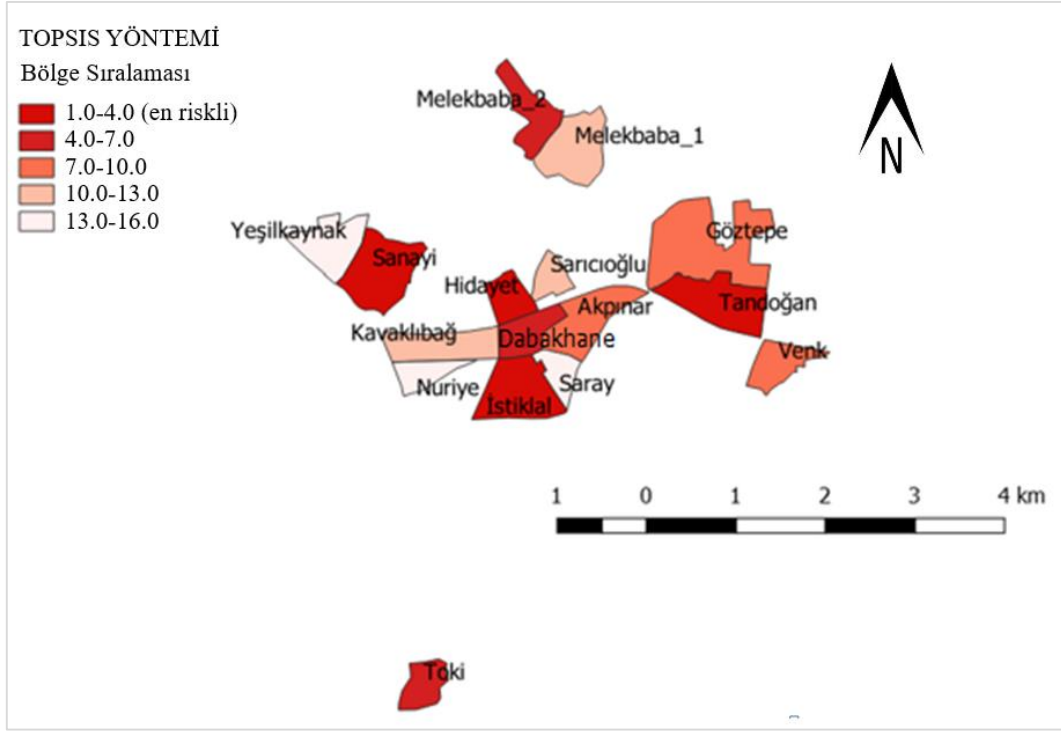
tespit edilmediği sürece fiziki kayıp oranı artmaktadır. Bu nedenle, yüzeye çıkan arıza oranının ve rapor edilmeyen sızıntıların fazla olması, su kayıp oranını ve işletme maliyetini arttırmakta ve normal işletme koşullarını bozmaktadır. Bu nedenle bu sonuçların problemin doğasıyla benzerlik gösterdiği söylenebilir. Tablodaki sonuçlara göre, yıllık su kesinti sayısı için hesaplanan katsayısının da yüksek seviyede olduğu söylenebilir. Su kesintisinin yüksek olduğu bölgelerde, abonelere istenen miktarda su düzenli olarak iletilmediği için sosyal olarak olumsuz etki oluşturmaktadır. Ayrıca, sürekli kesinti yaşanan sistemde, şebeke elemanları sürekli olarak ani basınç değişimlerine maruz kalacağından dolayı yeni arızaların oluşması, işletme maliyetinin artması gibi olumsuz sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak hesaplanan ağırlık katsayılarının sistemin fiziksel yapısı ile uyumlu olduğu ve değişkenlerin temsil oranının gerçeği yansıttığı söylenebilir [17].

#### 4.2. Rehabilitasyon için Öncelikli Bölgelerin Belirlenmesi

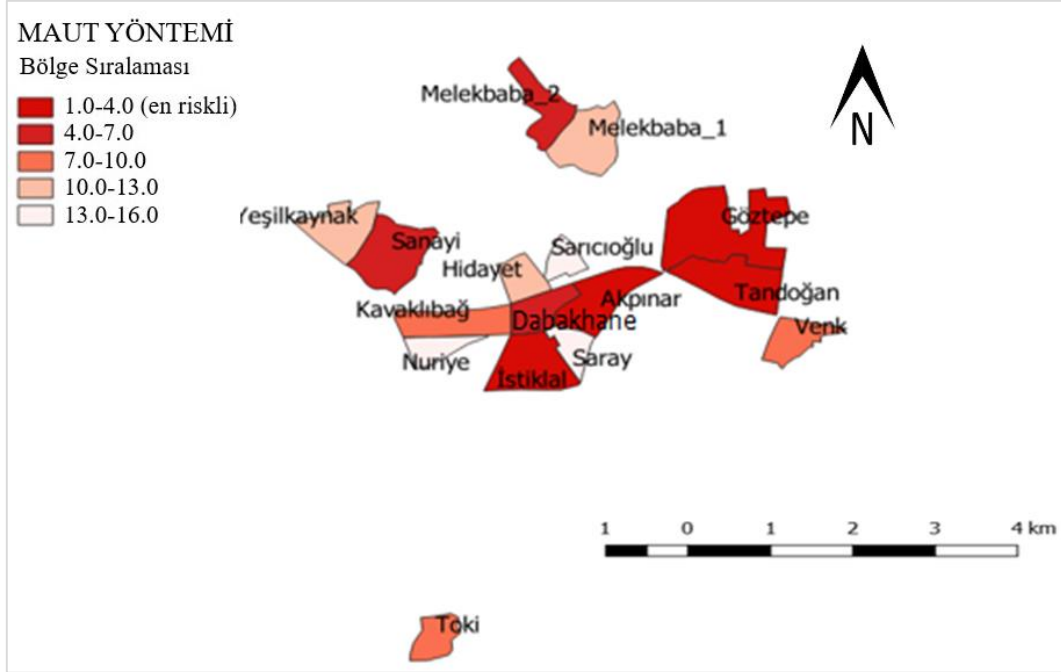
Çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri olan TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin belirli kriterler doğrultusunda sıralaması yapılmaktadır. İzole bölgelere ait veriler MS Excel ortamında oluşturularak MATLAB tabanlı geliştirilen karar destek yazılımına aktarılmış ve öncelikli bölgeler belirlenerek sıralanmıştır (Tablo 4). QGIS ortamında rehabilitasyon önceliği olan bölgelerin haritaları koyu renkten açık renge görselleştirilmiştir [17] (Şekil 3). Benzer şekilde MAUT yönteminde hem niteliksel hem de niceliksel kriterler baz alınarak en uygun alternatif bulmaya yönelik kullanılan bir yöntemdir. MAUT yöntemi, alternatifler arasında karar vermek ve ortak bir temel sağlamak için sistematik şekilde çalışmaktadır. ENTROPI yöntemi ile faktör ağırlıklarının belirlenmesinden sonra ve alternatifler sıralanarak öncelikli bölgeler belirlenmiştir [17] (Tablo 4, Şekil 3).

**Tablo 4.** Rehabilitasyonda Öncelikli Bölgelerin Nihai Sıralaması [17]

Bölge	Sonuçlar	Sıralama (TOPSIS)	Bölge	Sonuçlar	Sıralama (MAUT)
Tandoğan	0.5602	1	İstiklal	0.5113	1
İstiklal	0.4126	2	Tandoğan	0.4636	2
Hidayet	0.3876	3	Göztepe	0.442	3
Sanayi	0.3651	4	Akpınar	0.4116	4
Melekbaba_2	0.3622	5	Sanayi	0.3985	5
Dabakhane	0.3523	6	Dabakhane	0.3579	6
Toki	0.3514	7	Melekbaba_2	0.3489	7
Akpınar	0.3405	8	Kavaklıbağ	0.3299	8
Göztepe	0.3217	9	Toki	0.326	9
Venk	0.3156	10	Venk	0.3181	10
Kavaklıbağ	0.2765	11	Melekbaba_1	0.3062	11
Sarıcıoğlu	0.2423	12	Hidayet	0.3036	12
Melekbaba_1	0.2356	13	Yeşilkaynak	0.2701	13
Yeşilkaynak	0.2323	14	Nuriye	0.2653	14
Nuriye	0.2261	15	Saray	0.2411	15
Saray	0.2051	16	Sarıcıoğlu	0.229	16



a)



b)

a)Şekil 3. Rehabilitasyonda öncelik sıralaması a) TOPSIS yöntemi b) MAUT yöntemi [17]

Şekil ve tabloda verilen sonuçlara göre, TOPSIS yöntemine göre, rehabilitasyonda öncelikli ilk 5 bölge, Tandoğan, İstiklal, Hidayet, Sanayi ve Melekbaba 2 bölgeleri şeklinde elde edilmiştir. Bu yöntemden elde edilen sonuçlara göre, Yeşilkaynak, Nuriye ve Saray ise diğer bölgelere göre daha iyi durumda olan bölgeler şeklinde değerlendirilebilir. Benzer şekilde MAUT yöntemi sonuçları incelendiğinde, rehabilitasyon önceliği olan bölgelerin sıralamasında ilk 5 bölge temel olarak, İstiklal, Tandoğan, Göztepe, Akpınar ve Sanayi bölgeleri şeklinde oluştuğu görülmektedir. Bu yöntemde göre, Nuriye, Saray, Sarıoğlu ise diğer bölgelere göre daha iyi

durumda olan bölgeler şeklinde ifade edilebilir. Her iki yöntem ile elde edilen sonuçlar kıyaslandığında genel olarak rehabilitasyon önceliği olan ilk 5 bölgede 3 bölgenin ortak olduğu görülmektedir. Elde edilen sıralamanın, bölgelerde değişkenlere ait saha verileri ile uyum içinde olduğu söylenebilir. Tablo 2 ve 3'teki veriler ile değerlendirme yapıldığında, en riskli bölge olarak tanımlanan Tandoğan bölgesinde şebeke ve servis bağlantı arıza oranlarının oldukça yüksek olduğu, su kesinti sayısı ve rapor edilmeyen sızıntı miktarının ise ortalamanın üzerinde olduğu görülmektedir. Diğer taraftan en az riskli olarak tanımlanan Saray mahallesinde, servis bağlantı ve şebeke arıza oranlarının düşük seviyede olduğu, rapor edilmeyen sızıntı miktarı ve su kesinti sayısının yine düşük seviyede olduğu Tablo 2 ve 3'ten görülmektedir.

Bilindiği üzere su kayıp analizinde ve şebeke yönetiminde iki temel maliyet söz konusudur. Bunlar, arıza, bakım ve onarım ve su kayıpları ile mücadelede yöntemlerin uygulanması ile ortaya çıkan işletme maliyetleri ve şebeke rehabilitasyonu ve boru malzemesi yönetimini içeren ilk yatırım maliyeti şeklindedir. Bu maliyetler, sistemin fiziksel özellikleri, su kayıp oranları, arıza sayıları ve çevresel faktörlerin etkisine bağlı olarak değişmekte ve zamanla kuruma önemli yükler getirmektedir. Özellikle su kayıp yönetiminde şebeke rehabilitasyonu ve boru malzeme değiştirme stratejisi, ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, kazı ve inşaat faaliyetlerinden dolayı olumsuz sosyal etkilerinin fazla olması gibi nedenlerden dolayı en son tercih edilmesi gereken yaklaşım olarak önerilmektedir. Bu nedenle, su yönetiminde ve su kayıpları ile mücadelede ilk yatırım maliyetinin düşürülmesinde ve mevcut boru hatlarından en fazla fayda sağlamak için rehabilitasyonda öncelikli bölgelerin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bundan dolayı bu çalışmadan elde edilecek sonuçların, su yönetimi ve su kayıpları ile mücadelede idareler için önemli bir referans teşkil edeceği düşünülmektedir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada su kayıplarının önlenmesi amacıyla dağıtım sistemlerinde rehabilitasyonda öncelikli bölgelerin TOPSIS ve MAUT gibi çoklu ölçütlü karar verme yöntemleri ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında öncelikli olarak detaylı literatür araştırması yapılarak şebeke yönetiminde etkili olabilecek toplam 28 faktör belirlenmiştir. Çoklu ölçütlü karar verme yöntemlerinin uygulanmasında sadece tek faktörün göz önünde bulundurulması yerine tüm faktörler aynı anda dikkate alındığı için her bir faktörün problem üzerindeki etki düzeyi (ağırlık katsayısı) belirlenmiştir. Bunun için ENTROPI yöntemi uygulanmış ve saha verilerine göre her bir değişkene ait ağırlıklar hesaplanmıştır. Tabloda verilen sonuçlar incelendiğinde, en yüksek ağırlık katsayılarının, tespit edilen sızıntı miktarı, şebeke ve servis bağlantı arıza sayıları, bölgede değiştirilmiş boru yüzdesi faktörleri için hesaplandığı görülmektedir. Sızıntı miktarının ve arıza oranının fazla olması, hizmet kalitesinin düşmesine, sistem işletme maliyetinin artmasına, abone şikayetlerinin artmasına ve su kaynağı verimsizliğine neden olmaktadır. Bu sonuçların problemin doğasıyla benzerlik gösterdiği söylenebilir. Ağırlık katsayılarının hesaplanmasında gerçek saha verileri dikkate alındığından dolayı, problemin doğal yapısını temsil edecek nitelikte ağırlık katsayılarının elde edildiği düşünülmektedir. Çalışmada hesaplanan ağırlık katsayıları ve değişkenlere ait saha verileri esas alınarak TOPSIS ve MAUT yöntemleri ile rehabilitasyonda öncelikli bölgeler belirlenmiştir. TOPSIS yöntemine göre, rehabilitasyonda öncelikli ilk 5 bölge, Tandoğan, İstiklal, Hidayet, Sanayi ve Melek Baba 2 bölgeleri şeklinde elde edilmiştir. Benzer şekilde MAUT yöntemi sonuçları incelendiğinde, rehabilitasyon önceliği olan bölgelerin sıralamasında ilk 5 bölge temel olarak, İstiklal, Tandoğan, Göztepe, Akpınar ve Sanayi bölgeleri şeklinde oluştuğu görülmektedir. Ağırlık katsayılarının doğru bir şekilde hesaplanmış olması ve verilerin doğru bir şekilde ölçülmüş olması, bu tür yöntemlerde model sonuçları üzerinde oldukça etkilidir. Her iki yöntemden elde edilen sonuçların birbirine yakın çıkmasında, ağırlık katsayılarının saha verilerine göre elde edilmesi ve problemin doğal yapısıyla uyumlu olması gösterilebilir. Böylece gerçek veriler dikkate alınarak yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar, daha gerçekçi değerlendirme yapma imkanı sunmaktadır. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçların, su yönetimi ve su kayıpları ile mücadelede idareler için önemli bir referans teşkil edeceği düşünülmektedir. Ayrıca, şebekede en riskli bölgelerin belirlenmesi ve rehabilitasyona en riskli bölgelerden başlanması kaynakların (su kaynağı, personel ve işgücü, mali kaynakları) daha verimli kullanılması açısından önemli kazanımlar ve katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma, Şeymanur GÜL tarafından tamamlanan Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir. Çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (İÜ-BAP FYL-2017-583, FOA 2018-626) numaralı projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar, desteklerinden dolayı İÜ-BAP Birimi'ne, veri ve teknik destekten dolayı MASKİ Genel Müdürlüğü'ne teşekkür etmektedir.



### Kaynaklar

- [1] Choi T, Koo J. A water supply risk assessment model for water distribution network. *Desalin. Water Treat*, 2015; 54: 1410–1420.
- [2] Ennaouri I, Fuamba M. New Integrated Condition-Assessment Model for Combined Storm-Sewer Systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 2013; 139: 53–64.
- [3] Haider H, Sadiq R, Tesfamariam S. Selecting performance indicators for small and medium sized water utilities: Multi-criteria analysis using ELECTRE method. *Urban Water J.* 2015; 12(4): 305–327
- [4] Tscheikner-Gratl F. Integrated rehabilitation planning of urban infrastructure systems using a street section priority model. *Urban Water J.*,2015; 9006: 1–13.
- [5] Tsitsifli S, Kanakoudis V, Bakouros I. Pipe Networks Risk Assessment Based on Survival Analysis. *Water Resour. Manage.* 2011; 25: 3729–3746.
- [6] Göral R. Turizm Destinasyonu Rekabetçilik Faktörleri Ve Entropi Yöntemiyle Ağırlıklandırılması. *Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 2016; 2: 66–81.
- [7] Inanloo B. A decision aid GIS-based risk assessment and vulnerability analysis approach for transportation and pipeline networks. *Saf. Sci.* 2016; 84: 57–66.
- [8] Li Z. Water pipe condition assessment: A hierarchical beta process approach for sparse incident data. *Mach. Learn.* 2014; 95: 11–26.
- [9] Fares H A, Zayed T. Evaluating the Risk of Water Main Failure Using a Hierarchical Fuzzy Expert System. 2008; CSCE 2008 Annual Conference, June 10-13. 1–11.
- [10] Sargaonkar A. Risk assessment study for water supply network using GIS. *J. Water Supply Res. Technol. AQUA*, 2009; 57: 355–360.
- [11] Francisque A. Prioritizing monitoring locations in a water distribution network: A fuzzy risk approach. *J. Water Supply Res. Technol. AQUA*,2009; 58(7): 488–509.
- [12] Morais D C, Almeida, ATDe. Water network rehabilitation : A group decision-making approach. *WaterSA*. 2010; 36(4): 487–494.
- [13] Roozbahani A, Zahraie B, Tabesh M. PROMETHEE with Precedence Order in the Criteria (PPOC) as a New Group Decision Making Aid: An Application in Urban Water Supply Management. *Water Resour. Manage.*. 2012; 26(12): 3581–3599.
- [14] Francisque A . A decision support tool for water mains renewal for small to medium sized utilities: A risk index approach. *J. Water Supply Res. Technol. AQUA*, 2014; 63(4): 281–302.
- [15] Scholten L. Strategic rehabilitation planning of piped water networks using multi-criteria decision analysis. *Water Research*, 2014; 49: 124–143.
- [16] Marzouk M, Hamid SA, El-Said M. A methodology for prioritizing water mains rehabilitation in Egypt. *HBRC Journal. Housing and Building National Research Center*. 2015; 11(1): 114–128.
- [17] Gül Ş. Determination of Priority Regions for Rehabilitation in Water Distribution Systems. Master of Science Thesis, İnönü University. 2018.
- [18] MASKİ (2018). Malatya Water and Sewerage Administration General Directorate. Water Supply Unit Report.
- [19] Hwang C-L, Yoon K. Multiple Attribute Decision Making. *Lecture Notes in Economic and Mathematical Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 1981; 269. DOI: 10.1007/978-3-642-48318-9
- [20] Uzun S, Kazan H. Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden AHP TOPSIS ve PROMETHEE Karşılaştırılması Gemi İnşada Ana Makine Seçimi Uygulaması. *J of Transportation and Logistics*. 2016; 1(1): 1–18.
- [21] Fishburn P . Additive utilities with finite sets: Applications in the management sciences. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1967; 14(1): 1-13.
- [22] Keeney R, Fishburn P. Seven independence concepts and continuous multiattribute utility functions. *Journal of Mathematical Psychology*, 1974; 11(3): 294-327
- [23] Loken E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2007; 11: 1584-1595.
- [24] Tunca PMZ. Evaluating the Performances of the Opec Countries By Using Entropi and Maut Multi Criteria Decision Making Methods. 2016; 1–12.

## Genetik Algoritma Yöntemiyle Dairesel Cepli Hidrostatik Kaymalı Yatakların Optimizasyonu

Fazıl CANBULUT<sup>1</sup>, Hakan Burçin ERDOĞUŞ<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Makine Programı, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, İzmir Kavram Meslek Yüksekokulu, İzmir, Türkiye

<sup>1</sup>canbulut@erciyes.edu.tr, <sup>2</sup>\*hakan.erdogus@kavram.edu.tr

(Geliş/Received: 02/06/2020;

Kabul/Accepted: 23/11/2020)

**Öz:** Endüstride eksenel pistonlu motor ve pompalarda kullanılan kayıcı pabuçlar, çalışma esnasında hidrostatik eksenel kaymalı yatak davranışı göstermektedir. Literatürde, bu pompa ve motorların toplam güç ihtiyacını minimum ve sistemin rijitliğini maksimum olmasını amaçlayan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, hidrostatik eksenel kaymalı yatak için teorik analiz ve deneysel bulgulardan optimum tasarım parametreleri ve çalışma şartları belirlenmiştir. Deneysel çalışma koşulları, teorik sınırlamalarla birlikte ele alınarak çoklu kriter analizi gerçekleştirmek amacıyla yapay zeka optimizasyon yöntemlerinden biri olan genetik algoritma tekniği kullanılmıştır. Genetik algoritma optimizasyonu, çalışma şartlarını ve tasarım parametrelerini belirlemede geniş bir çözüm kümesi sunmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde yatak yükleme basıncı 30 bar için yatak yarıçap oranı 0,3537 ve 0,7346 arasında, kılcal boru (orifis) çapı (mm) 0,25 ve 0,4; devir sayısı (dev/dak) 1141 ve 1496 arasında optimum parametre değerleri olarak belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hidrostatik kaymalı yataklar, eksenel pistonlu pompa, genetik algoritma optimizasyonu.

### Optimization of Circular Pocket Hydrostatic Sliding Bearings by Genetic Algorithm

**Abstract:** The sliding pads used in industry with axial piston motors and pumps show hydrostatic axial sliding bearing behavior during operation. There are studies in the literature which aim to maximize the rigidity of the system and minimize the total power requirement of these pumps and motors. In this study, optimum design parameters and working conditions were determined from theoretical analysis and experimental findings for hydrostatic axial sliding bearing. In order to perform multiple criterion analysis, genetic algorithm technique which is one of the artificial intelligence optimization methods has been used by considering experimental working conditions with theoretical limitations. Genetic algorithm optimization offers a wide range of solutions for determining working conditions and design parameters. As a result of the studies, the pump pressure for 30 bar bearing radius ratio between 0.3537 and 0.7346, capillary tube (orifice) diameter (mm) 0.25 and 0.4, speed of bearings (rpm) between 1141 and 1496 is determined as the optimum parameter value.

**Key words:** Hydrostatic sliding bearings, axial piston pumps, genetic algorithm optimization.

### 1. Giriş

İki katı yüzey arasındaki izafi harekete bağlı, dış sistemden basınçlı yağlayıcı akışkan gönderilerek, yağ film tabakası oluşturulması prensibine göre çalışan elemanlara hidrostatik yatak denir. İş makinelerinde eksenel pistonlu pompa ve motorlar, pozitif basınç sağlamak için yaygın bir kullanıma sahiptir. Bu pompaların en önemli kısımlarından biri kayıcı pabuç-plaka çiftidir. Kayıcı pabuçlar hidrostatik yatak prensibine göre çalışmaktadır ve geometrik özellikleri pompa ve motor performansını önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışmada, dairesel kesitli hidrostatik yatak performansı araştırılmıştır. Yatak performansına etki eden parametrelerin uygun değerlerinin belirlenmesi için, deneysel çalışmaların gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesinden dolayı, triboloji laboratuvarındaki test düzeneğinden faydalanılmıştır. Geometrik büyüklükler olarak kayıcı pabuç cebine basınçlı yağın gönderildiği kılcal boru/orifis çapı ile iç ve dış cep çap büyüklükleri etkili olmaktadır. Bunun yanı sıra yükleme basıncı, izafi hız ve yağlayıcı akışkan viskozitesi, hidrostatik yatak rijitliği ve yatak kayıpları, viskoz sürtünme ve sızıntı güç kaybı da önemli çalışma faktörleri arasında yerini almaktadır. Kaymalı yatakların performansının deneysel olarak ölçülmesi için test düzeneğinin kurulması ile birlikte, bir dizi çalışmalar yapılarak yatak sistemi üzerinde etkili olan parametrelerin uygun değerlerin belirlenmesine katkı sağlanmıştır [1,2]. Dairesel cepli hidrostatik kaymalı yataklarda yüzey pürüzlülüğü ve yağlama arasındaki etkileri incelemek üzere yapılan deneysel bir çalışmada, farklı yüzey pürüzlülük değerleri (Ra), orifis çapları, hidrostatik cep büyüklüklerine sahip kayıcı pabuçlar yükleme basıncı ve farklı hızlardaki etkileri araştırılmıştır [3,4].

\* Sorumlu yazar: [hakan.erdogus@kavram.edu.tr](mailto:hakan.erdogus@kavram.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-0493-0550, <sup>2</sup>0000-0002-2947-7510

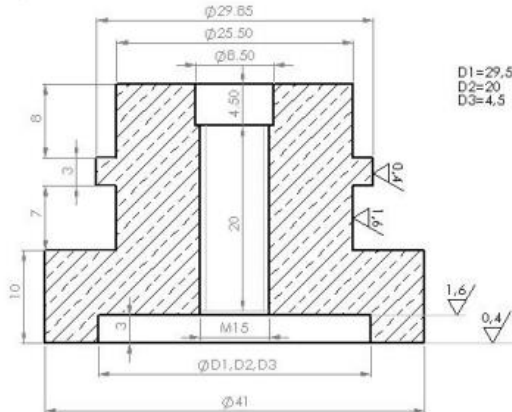
Hidrostatik kaymalı yataklarda ihtiyaç olan toplam gücün en az ve sistemin taşınması gereken yükün en fazla olması yapılan teorik ve deneysel çalışmaların temelini oluşturmuştur. Bu kapsamda araştırmalar, hidrostatik yatak sisteminin çalışma şartlarına etki eden bazı parametreler üzerine yoğunlaşmıştır. Bunlar; yatak cebinde oluşan basınca doğrudan etki eden kılcal boru (orifis) çapı, hidrostatik yatak alanını belirleyen yatak yarıçap oranı ve sisteme sevk edilen akışkan yağ debisi ve sürtünmeye harcanan güce etki eden devir sayısıdır.

Belirli sınırlamalar olması durumunda, bilinmeyen parametre değerlerinin bulunması veya sezgisel algoritmalar gibi herhangi bir amacı gerçekleştirmek için yakınsama özelliğini kullanarak kesin çözüme yakın bir değer en iyileme veya optimizasyon olarak adlandırılmaktadır. Dairesel cepli hidrostatik kaymalı yataklarda ihtiyaç olan toplam güç için yapılan bir optimizasyon çalışmasında, yatak katsayısı tanımlanmış ve minimum sıcaklık artışı ile birlikte minimum toplam güç ihtiyacı incelenmiştir. Buna göre, ikili kriterle yapılan optimizasyonun, yatakta meydana gelen sıcaklık değişimi ve gerekli olan toplam güç miktarı açısından tek kriterli optimizasyona göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [5]. Benzer şekilde parçacık sürüsü optimizasyon yöntemini kullanarak yapılan benzer bir başka çalışmada, çeşitli tasarım değişkenleri ve çalışma parametreleri belirlenmiştir. Mühendislik optimizasyonunda yapay zekâ algoritmaları çoklu analiz açısından daha uygun sonuçların elde edilmesini sağlamıştır [6]. Radyal kaymalı yatağın optimum tasarımını amaçlayan bir başka çalışmada, genetik algoritma yaklaşımı optimizasyon yapılmıştır. Genetik algoritma yaklaşımıyla yapılan optimum tasarımın geleneksel optimizasyon yöntemleriyle kıyaslandığında, daha esnek ve etkin olduğu sonucuna varılmıştır [7-9]. Isı eşanjörlerinde bulunan kanatların genetik algoritma yöntemiyle optimizasyonu üzerine yapılan bir çalışmada elde edilen büyüklüklerle, önceden üretilen model karşılaştırıldığında ısı transfer oranında artışa ve güç tüketiminde azalma gözlenmiştir [10].

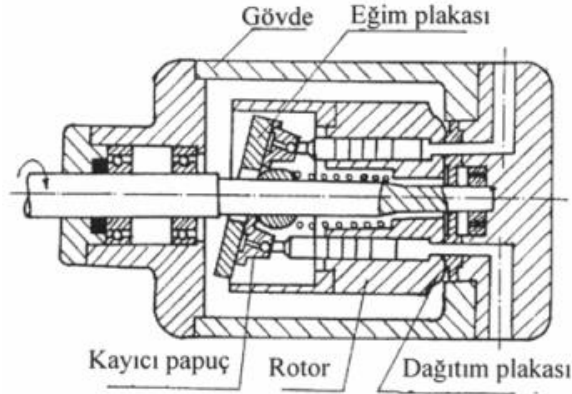
Eksenel pistonlu pompalarda bulunan ve dairesele cepli eksenel kaymalı yatak özelliği gösteren kayıcı pabuçlar için deneysel ve teorik analiz sonrasında tasarım parametreleri ve en uygun çalışma şartları belirlenmiştir. Genetik algoritma optimizasyon yöntemiyle, maksimum sistem rijitliği ve minimum toplam güç ihtiyacı için gerekli olan değerler çözüm kümesi kapsamında tespit edilmiştir ve elde edilen veriler karşılaştırılarak sınır değer aralıkları oluşturulmuştur.

## 2. Teorik Analiz

Hidrolik güç iletim sistemleri elemanlarından biri olan kayıcı pabuçlar veya kaymalı yatakların verimliliği önemli çalışma konularından biri olmuştur. Şekil 1’de kesit görünüşü verilen bir eksenel pistonlu pompada, rotorun açısal hareketiyle kaymalı yatak üzerinde bulunan pistonların ileri ve geri hareketleri sayesinde pompa basıncı oluşmaktadır. Bu durum, sabit duran eğim plakası ile kaymalı yatak arasında oluşan kayma hareketiyle gerçekleşmektedir [11]. Şekil 1’de pirinç malzemeden imal edilen ve deneysel analiz için kullanılan bir hidrostatik eksenel kaymalı yatak kesiti görülmektedir.



Şekil 1. Hidrostatik eksenel cepli kaymalı yatak.



Şekil 2. Eksenel pistonlu pompa ve elemanları.

Hidrodinamik yağlama sisteminin incelenmesi Navier – Stokes hareket denkleminde dayanır. Bu denklemle birlikte çözümü süreklilik denkleminde ele alınır. Dairesel cepli bir hidrostatik yağlama sisteminde oluşan sıvı sürtünmesi için sınır şartlarına göre sabitler tespit edilirse, basınç fonksiyonundan radyal doğrultudaki akış debisi Eş.1 denkleminde hesaplanabilir.

$$Q_d = \frac{\pi p_c}{6\mu} \frac{h^3}{\ln(r_d/r_i)} \quad (1)$$

Bu denklemde  $r_d/r_i$  yatak yarıçap oranını göstermektedir. Şekil 1’de deneysel analiz için kullanılan hidrostatik kaymalı yatak cebine karşılık gelen  $p_c$  basıncının,  $p_p$  piston basıncına oranı  $p_c/p_p$ , bu sistemlerin çalışma faktörlerinde belirleyici rol oynamaktadır. Kılcal boru veya orifis içerisinde geçen akışkan debisi cep basıncı ve pompa basıncına bağlı olarak değişmektedir. Bu denklem Eş.2’de verilmektedir.

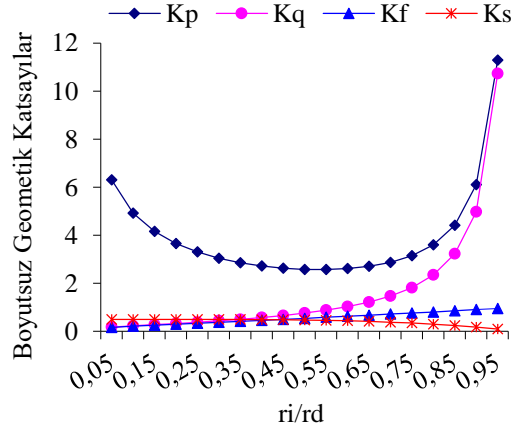
$$Q_k = \frac{\pi d^4}{128l\mu} (p_p - p_c) \quad (2)$$

Bu eşitlikte;  $Q_k$  kılcal borudan geçen akışkan debisi,  $l$  kılcal boru uzunluğu ve  $\mu$  akışkanın viskozitesi olarak tanımlanmaktadır. Sabit yükleme basıncında, cep içindeki  $p_c$  ‘nin yükselmesi, kısıcıcı eleman olan kılcal borudan geçen debinin azalmasına ve aksi hali ise büyümesine sebebiyet vermektedir. Hidrostatik yataklama sisteminin önemli bileşenlerinden olan pompa ve cep basıncı, toplam gücün belirlenmesinde kullanılmaktadır. Buna göre, eksenel hidrostatik kaymalı yataklarda gerekli olan toplam güç, pompa gücü ve sürtünme gücünün toplamı olarak ifade edilmektedir. Yatak için gerekli olan toplam güç ihtiyacı Eş.3’deki gibi verilmektedir [13].

$$P_{\text{toplam}} = P_{\text{sürtünme}} + P_{\text{pompa}} \quad (3)$$

$$P_{\text{toplam}} = K_s \mu \frac{\omega^2 r_d^2}{h} A + \frac{1}{\eta_p} K_p \left(\frac{F}{A}\right)^2 \frac{h^3}{\mu} \quad (4)$$

Eş.4’te verilen  $K_p$  pompa gücü ve  $K_s$  sürtünme gücü için geometrik katsayılarıdır. Bunlarla birlikte, hidrostatik sistemdeki debi hesabı için  $K_q$ , yük taşıma kapasitesi için ise  $K_f$  kuvvet katsayısı kullanılmaktadır. Bu katsayılar, yatak yarıçap oranına bağlı olarak değişmektedir. Boyutsuz geometrik katsayıların yatağın iç ve dış yarıçapına bağlı olarak değişimi Şekil 3’de verilmiştir. Eş.4’e göre toplam gücün minimum yapılmasını sağlayan pompa gücü katsayısını minimum yapan değer 2,5713 olarak elde edilmiştir. Bu şartlarda yarıçap oranı 0,5335 olduğunda pompa gücü minimum olmaktadır. Solmaz [5], yapmış olduğu çalışmada elde etmiş olduğu bu değer teorik olarak sürtünme gücü katsayısına göre pompa gücü katsayısının daha fazla etkisi olduğu sonucuna ulaşmıştır.



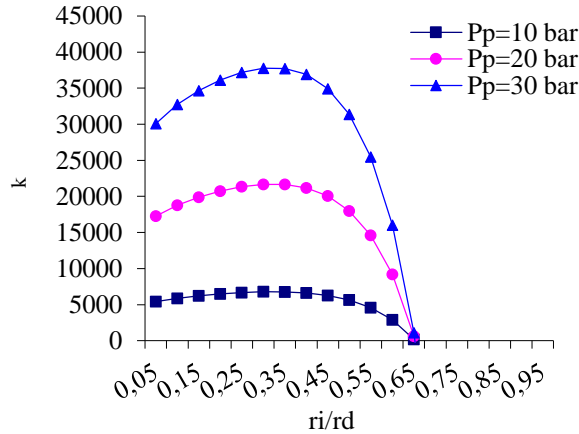
Şekil 3. Boyutsuz katsayıların yatak yarıçap oranına göre değişimi.

Dairesel cepli kaymalı yatak tasarımı önemli bir fonksiyon olarak ele alınan hidrostatik sistem rijitliği, Eş.5'te verildiği gibi film kalınlığına göre sistemin taşıdığı yük değişimi olarak tarif edilmektedir [13].

$$k = -\frac{dF}{dh} \quad (5)$$

$$k = 3K_f A p_c \frac{1}{h} \quad (6)$$

Yarıçap oranının kayma yüzeyindeki yük dengesi Eş.6 denkleminde görüldüğü gibi cep basıncına ve yarıçap oranına bağlı olarak değişmektedir. Hidrostatik sistem rijitliği hesaplaması için yatak dış yarıçapı 20,5 mm, kılcal boru veya orifis boyu 5 mm ve çapı 0,5 mm geometrik özelliklerine sahip olan dairesele cepli yatağa 30 Pa pompa basıncı uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

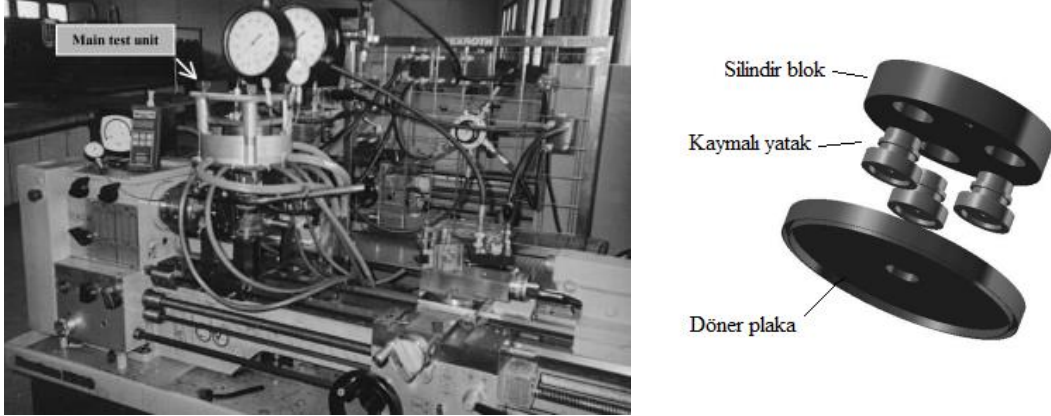


Şekil 4. Yatak yarıçap oranına bağlı olarak hidrostatik sistem rijitliğindeki değişim [5,12].

Şekil 4'den görüldüğü gibi yarıçap oranına bağlı olarak yağ film kalınlığında meydana gelen değişim sürtünme güç kaybını dolayısıyla toplam gücü ve hidrostatik sistem rijitliği değerlerini etkilemektedir. Bu değerlerin, çalışma faktörleri açısından optimum nitelikte bir tasarım parametresi olarak yarıçap oranının önemi açısından gerekli olduğu anlaşılmaktadır. Yatak rijitliğinin yarıçap oranlarına göre değişimi incelendiğinde, maksimum olduğu yarıçap oranı değerinin  $r_i/r_d \leq 0,3537$  olduğu tespit edilmiştir. Bu değer, teorik analiz açısından hidrostatik sistem rijitliğini optimum yapan çalışma parametresi olarak kabul edilmiştir. Genetik algoritma optimizasyonu yapılırken, minimum toplam güç ihtiyacı fonksiyonuna sistemin yük taşıma kapasitesi bakımından tasarım sınırlaması olarak dâhil edilmiştir.

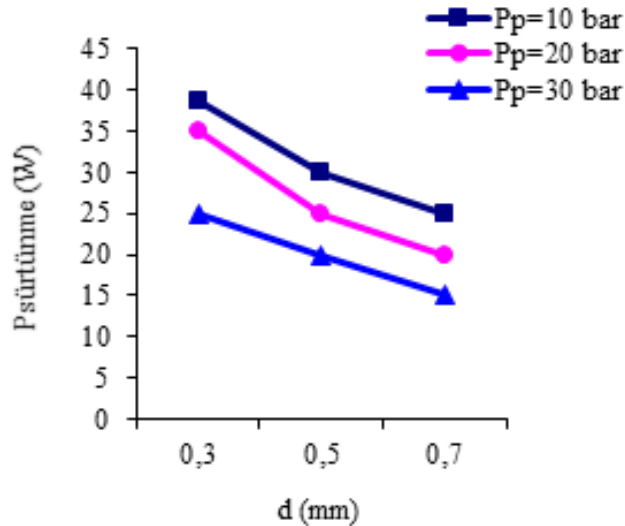
### 3. Deneysel Yöntem

Hidrostatik eksenel kaymalı yatakların çalışma parametrelerinin belirlenmesi kapsamında kurulan deney tesisatı Şekil 5'te görülmektedir. Ana deney sisteminin alt sistem elemanları veri toplayıcısı, test ünitesi, ölçekli kap, hidrolik pompa, kontrol valfi ve servo motordan oluşmaktadır. Ana test ünitesinde ölçüm yapmak için termokupl ve manometre kullanılmıştır. Eksenel pistonlu pompalardaki eğim plakası görevinde olan döner plaka, servo motor yardımıyla tahrik edilmektedir. Güç ünitesi bölümünde servo motorun hassasiyeti kontrol edilmektedir [1].



Şekil 5. Eksenel hidrostatik-hidrodinamik deney seti ve kaymalı yatakların yerleşimi [4].

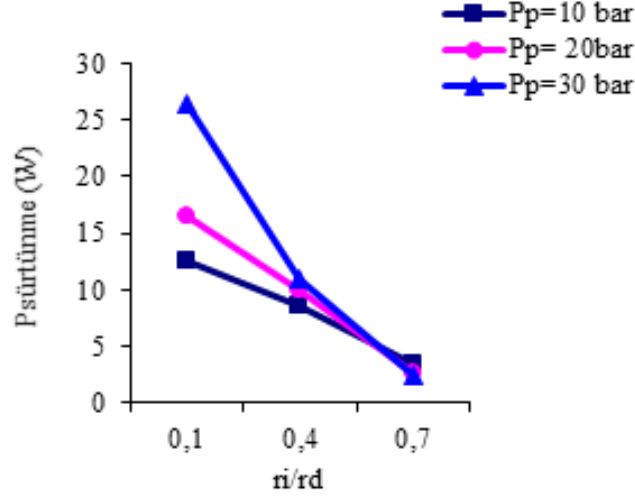
Silindir bloğa yerleştirilen kaymalı yatakların z-yönünde hareketi serbest bırakılmıştır. Döner plaka ve silindir blok arasındaki mesafe z-yönünde ayarlanabilir bir mil yardımıyla sağlanmıştır. Kontrol ünitesi bölümünde yer alan veri toplayıcısı, test ünitesinden gelen elektriksel ölçümleri tork, basınç ve sıcaklık değeri olarak kaydetmektedir. Kaymalı yatağın ön, arka ve yan kenarındaki basınç değişimi sensörlerle ölçülmüştür. Kaymalı yatak içerisine yerleştirilen kılcal boru aracılığıyla bu bölgeler üzerinde basınç değişimi sağlanabilmektedir.



Şekil 6. Sürtünme güç kaybının kılcal boru çapına göre değişimi.

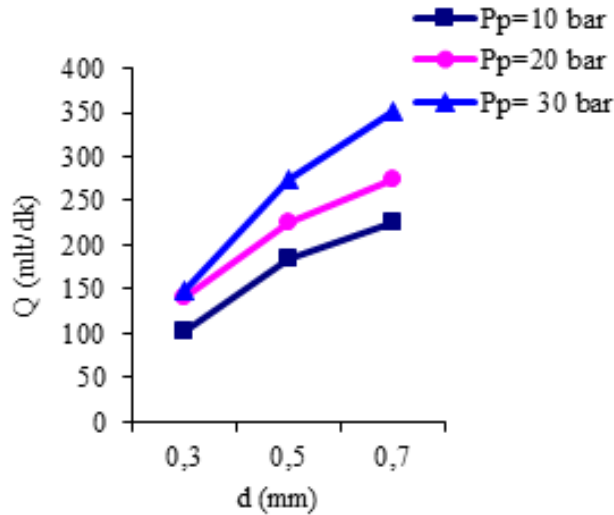
Kaymalı yatak cebine üst bölgeden yağ gönderen ve iç çapı 0,3-0,5 ve 0,75 mm olan kılcal borular (veya orifisler) kullanılmıştır. Kaymalı yataklar üzerine yapılan eşit yükleme basınçları ve çalışma hızları deneysel yöntemin temelini oluşturmuştur. Ortam sıcaklığı 20°C civarında korunmuştur. Bu nedenle deneyde hava

soğutmalı bir sistem kullanılmıştır. Her deneyden önce ve sonra yağ sıcakları dijital termometre ile ölçülerek kaydedilmiştir. Deneyde yükleme basınçlarının basınç denetim valfi ile ayarlanması, yataklar altından çıkan akışkan miktarının ölçülmesi için kullanılan kronometre ve ölçüm kabının yerleştirilmesi, başlangıç ayarlarından sonra sistemin tümü için hazır hale getirilmektedir.

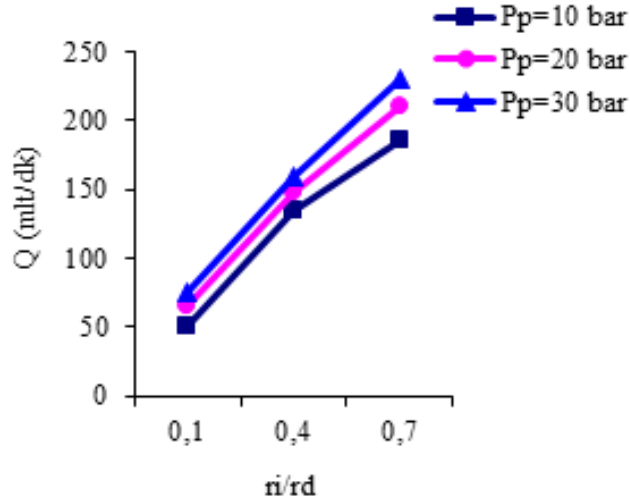


Şekil 7. Sürtünme gücü kaybı ve yarıçap oranı değişimi.

Silindir bloğuna yağ gönderen basınç denetim valfi ile basınç 10, 20 ve 30 bar olmak üzere üç farklı değerde ayarlanarak, yatakların farklı yüklerde incelenmesi sağlanmaktadır. Her bir yükleme basıncı için döner tabla 250, 500, 900 ve 1500 dev/dak olarak çalıştırılmıştır. Her bir çalışma için tezgâhın yük altında çalışırken harcadığı güç miktarları bir wattmetre ve sistemden sızan yağ akışı ölçekli kap ile belirlenmiştir. Şekil 6 ve 7’de görüldüğü gibi, kılcal boru çapı ve yarıçap oranının artmasıyla sürtünme gücü kaybı azalmıştır. Aynı pompa basıncı, döner plaka ile kaymalı yatak arasında oluşan yağ film tabakasındaki artışla birlikte sürtünme gücünün azalmasına sebep olmuştur. Yağ filminin artması sisteme ulaşan debi miktarının artması anlamına gelmektedir. Pompa basıncının yükselmesi ile birlikte kılcal boru çapının genişlemiş olması debi miktarını Şekil 7’de görüldüğü gibi yükseltmiştir.



Şekil 8. Kılcal boru çapına bağlı olarak akışkan debisi değişimi.



Şekil 9. Debinin yarıçap oranına bağlı olarak değişimi.

Deney sisteminde kayıcı plaka üzerinde yer alan üç kaymalı yatak için ölçülen değerler sayısal olarak üçe bölünerek bir yatak için oluşan sürtünme güç kaybı ve debi miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca, bu deney sisteminde yağ giriş ve çıkış sıcaklıkları, piston yükleme ve hidrostatik cep ve hidrodinamik yatak basınçları da belirlenebilmektedir. Deneysel çalışma için kullanılan kaymalı yatakların dış yarıçapı 20,5 mm de sabit tutularak, pabuç iç çapları yarıçap oranı 0,1-0,4 ve 0,7 mm değerlerine göre işlenmiştir. Şekil 8 ve 9 'da görüldüğü gibi kılcal boru ya da orifis çapı, devir sayısı ve hidrostatik cep oranındaki değişimler debi ve sürtünme güç kaybında etkili olmaktadır. Yarıçap oranının artmasıyla yağ film kalınlığı artacağından sürtünme güç kaybı da aynı doğrultuda artış göstermektedir. Eksenel pistonlu pompaların verimli çalışmasını sağlayan en önemli makine elemanı olarak kaymalı yataklar üzerine yapılan deneysel ve teorik analiz neticesinde, optimum çalışma şartları ve tasarım değişkeni değerlerinin; pompa basıncı 30 bar, yarıçap oranı 0,55 mm, devir sayısı 1000 dev/dak ve kılcal boru çapı ise 0,3 - 0,5 mm arası değişiklik gösterdiği belirlenmiştir [4].

#### 4. Genetik Algoritma Optimizasyonu

Optimizasyon problemi, belirlenen sınırlar çerçevesinde, bilinmeyen değerlerin bulunmasını içeren bir problem olarak ifade edilmektedir. Bu işlem için öncelikle karar veya tasarım parametreleri tanımlanmalıdır. Sınırlamalar, karar parametrelerine bağlı olarak ifade edilmektedir. Bazı sınırlamalar eşitsizlik, bazıları ise eşitlik biçiminde olabilir [12]. Genetik algoritmalar doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemidir. Bu algoritmalar fonksiyon optimizasyonu, çizelgeleme, mekanik öğrenme, tasarım ve hücresel üretim gibi alanlarda başarıyla uygulanmaktadır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerinden farklı olarak, parametre kümesinin kodlanmış biçimleri kullanılır. Olasılık temelinde çalışan genetik algoritmalar, çözüm uzayının tamamını değil belirli bir kısmını araştırarak çözüm aramaktadır. Genetik algoritmalar, mekanizma tasarımlarında verdiği sonuçlarla mühendislik optimizasyonlarında tercih edilmektedir [14-16].

Genetik Algoritma (GA), çözüm uzayındaki bir noktayı kromozom adı verilen ikili bit dizisi ile kodlar ve bu noktanın bir uygunluk değeri hesaplanır. Popülasyon olarak tanımlanan noktalar kümesi içerdiğinden tek bir noktaya bağlı değildir. Bu popülasyonda, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerle yeni kuşaklar oluşturulur. En iyi uygunluk değerine ulaşıncaya kadar popülasyon kuşakları yenilenir [15].

Dairesel cepli hidrostatik yatakların konstrüksiyonunda etkili olan çalışma şartları ve tasarım değişkenleri genetik algoritma yaklaşımıyla incelenmiştir. Teorik ve deneysel analizler sonucunda belirlenen ve yatak performansında etkili olan değişkenler yatak yarıçap oranı, kılcal boru (orifis) çapı ve devir sayısı değerleri;

$$\text{Yatak yarıçap oranı (mm)} \quad 0,05 \leq r_i/r_d \leq 0,95$$

$$\text{Kılcal boru (orifis) çapı (mm)} \quad 0,1 \leq d \leq 0,7$$

$$\text{Devir sayısı ( dev/dak)} \quad 750 \leq n \leq 1500$$



olarak optimizasyon işlemine alınmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, kılcal boru çapı üst sınır değeri olan 0,7 mm'den sonra atalet faktörü olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca, devir sayısı için belirlenmiş olan 750 dev/dak kaymalı yatak ile döner tabla arasındaki tam sıvı sürtünmesinin sağlanması ve deneysel olarak güç kayıplarının minimum olduğu değer olarak tespit edilmiştir [12]. Genetik algoritma optimizasyonu için minimize edilmek istenen hedef fonksiyonu hidrostatik kaymalı yatak için gerekli olan toplam güç ihtiyacı denklemini dikkate alınarak Eş.8 eşitliğindeki gibi gösterilmektedir.

$$F_{obj} = \text{Min}P_{\text{toplam}} \quad (7)$$

$$F(r_i/r_d, d, n) = P_{\text{sürtünme}} + P_{\text{pompa}} \quad (8)$$

#### 4.1 Çalışma şartları için sınırlamalar

Tasarım değişkenleri kısıtlayan ve optimum tasarımın oluşmasını sağlayan kriterler, tasarım sınırlamalarıdır. Hidrostatik eksenel yataklarda minimum toplam güç ihtiyacı için belirlenen ve çalışma şartlarının etki ettiği sınırlamalar Eş. 9 ve Eş. 10'da verilmiştir.

$$g_1(x) = h_{\min} - h < 0 \quad (9)$$

$$g_2(x) = W - W_{\max} < 0 \quad (10)$$

Minimum toplam gücü elde edebilmek için deneysel çalışma sonucunda belirlenen sıvı sürtünmesinin oluşmasında gerekli minimum yüzey pürüzlülük değeri  $h_{\min}$  ve hidrostatik sistem rijitliğinin maksimum olduğu yarıçap oranı değerindeki yük taşıma kapasitesi  $W_{\max}$  temsil etmektedir.

#### 4.2 İkili sistem planlaması

GA geliştirilmesinde, problemin çözümü için, tasarım değişkenlerinin aynı boyutlara sahip bitler dizisi biçiminde kodlanması Tablo 1'de verilmiştir. Optimizasyon gerçekleştirilmede seçilmesi gereken kontrol parametreleri için literatürde yer alan çalışmalardan faydalanılmıştır. Frezeleme için optimum kesme şartlarının araştırmasına yönelik yapılan bir GA optimizasyonunda 0,75 çaprazlama oranı ve 0,01 mutasyon oranı kullanılmıştır [17].

**Tablo 1.** Tasarım değişkenleri için ikili sistem planlaması.

	$r_i/r_d$	d	n
Alt sınır	0,05	0,1	750
Üst sınır	0,95	0,7	1500
Hassasiyet	0,001	0,001	5

Benzer bir çalışmada, tornalama için önceden belirlenen kesme sınırlamaları dahilinde maliyeti minimize eden optimal çalışma parametreleri belirlenirken 0,3 çaprazlama oranı ve 0,001 mutasyon oranı olarak alınmıştır [18]. GA optimizasyonu, çalışma şartları ve tasarım parametrelerini seçmede karar almak için kapsamlı bilgi vermektedir. Deneysel çalışmada kullanılan koşullar, teorik analiz ile birlikte sınırlandırıldığında aynı çalışma şartlarında toplam güç ihtiyacı farklı tasarım değişkenleri tarafından belirlenebilmektedir.

GA optimizasyon yöntemi, minimum toplam güç ihtiyacı problemi için geniş bir çözüm kümesi sunmaktadır. Dairesel cepli hidrostatik kaymalı yataklarda deneysel ve teorik çalışmalara göre optimum tasarımı sağlayabilmek için MATLAB Genetic Algorithm Tool kullanılmıştır. Bu amaçla, üç farklı pompa basıncında (10, 20 ve 30 bar) program çalıştırılmıştır. Yapılan analiz neticesinde Tablo 2'de görüldüğü gibi sınır değer aralıkları elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Üç farklı optimizasyon sonrası elde edilen sınır değer aralıkları.

	<i>Optimizasyon-1</i>	<i>Optimizasyon-2</i>	<i>Optimizasyon-3</i>
$r_i/r_d$ (mm)	0,3668 - 0,7207	0,3537 - 0,7124	0,3537 - 0,7346
d (mm)	0,3 - 0,47	0,27 - 0,42	0,25 - 0,4
n (dev/dak)	1166 – 1497	1182 – 1499	1141 – 1496
$MinP_{toplaml}$ (W)	10,48	8,13	6,64

## 5. Bulgular ve Tartışma

Eksenel pistonlu pompaların verimli çalışmasında etkili olan kayıcı pabuç (kaymalı yatak) tasarımları, hidrostatik şartlarda ele alındığında bazı parametreler ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada söz konusu parametreler, kaymalı yatağın çalışma şartları ve tasarım değişkenleri olarak ele alınmıştır. Deneysel bulgulardan faydalanılarak, dairesel cepli hidrostatik eksenel kaymalı yatağın verimli çalışması amacıyla ihtiyaç olan toplam güce; kılcal boru çapı, yatağın yarıçap oranı, yükleme basıncı ve devir sayısı etkili olmaktadır. Deneysel bulgularla tespit edilen bu parametrelerin, aynı çalışma şartlarında optimum olması istenen değerler için teorik analizi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan bilgisayar programı yardımıyla, deneysel olarak ölçülemeyen yağ film kalınlığı, yağ debisi ve pompa gücü gibi büyüklükler hesaplanmıştır. Buna göre, yarıçap oranının artmasıyla hem teorik hem de deneysel sürtünme güç kaybının azalmakta olduğu görülmüştür. Yarıçap oranının düşük değerinde ( $r_i/r_d=0,1$ ), teorik ve deneysel değerler arasındaki farkın büyük olması, teorik analizde yapılan kabullerden kaynaklanmaktadır. Yarıçap oranının yüksek değerinde ( $r_i/r_d=0,7$ ), her iki analiz sonucu birbirine yaklaşmaktadır. Döner tabla ile kaymalı yatak arasında sızan yağ debisi miktarı yarıçap oranının artmasıyla artmaktadır. Toplam güç ihtiyacının belirlenmesinde, yatak ile sürtünme yüzeyi arasındaki yağlamanın sağlanması için pompa gücünün önemi vurgulanmıştır. Pompa gücünün maksimum olduğu yarıçap oranı değeri 0,5335 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, hidrostatik sistem rijitliğinin oluşmasında ve yük taşıma kapasitesini meydana getiren unsurlara bakıldığında, optimum nitelikte olan bir yağ tabakası kalınlığı  $h'$ a, maksimum rijitliğe karşılık geldiği anlaşılmaktadır. Sistemin yük taşıma kabiliyetini belirleyen temel parametrelerden birisi olarak yağ film kalınlığı ile birlikte yarıçap oranının da belirleyici rol oynadığı anlaşılmıştır. Teorik analiz yapılırken, hazırlanan bir program yardımıyla film kalınlığının yarıçap oranı 0,3537 değerine ulaştıktan sonra azaldığı ve sistemin rijitliğini kaybettiği görülmüştür. Benzer şekilde, deneysel bulgularda 1000 dev/dak olarak belirlenen devir sayısının optimizasyon sonuçlarında 1141 dev/dak alt sınır değerinde olduğu görülmüştür. Kılcal boru çapının artmasıyla doğru orantılı olarak yağ film kalınlığı ve debi miktarının yükseldiği deneysel bulgularla elde edilmiştir. GA optimizasyonlarında kılcal boru çapı değeri en düşük 0,25 mm ve en yüksek 0,47 mm olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda 0,3-0,5 mm arası optimum değerde olduğu kabulü yapıldığından, optimizasyondan alınan değer aralıklarının deneysel bulguları doğruladığı görülmektedir. Bulgulara göre minimum toplam güç ihtiyacı 6,64 W olarak belirlenmiştir.

## 6. Sonuçlar

Deneysel bulgular ve teorik analiz sonuçlarına göre toplam güç ihtiyacının minimum ve hidrostatik sistem rijitliğini maksimum yapan tasarım değişkenleri ve çalışma şartları için optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyonu sınırlayan yağ film kalınlığı ve yük taşıma kabiliyeti, toplam güç ihtiyacı fonksiyonu minimize edilirken çözüm kümesinin oluşmasında ciddi katkı sağlamıştır.

Çoklu kriter analizi problemlerinin çözümünde genetik algoritma kullanılması, çözüm kümesini sınırlandırmakta ve sonuca yakınsama sağladığı bilinmektedir. Buna göre, üç farklı pompa basıncı giriş parametresi olarak kullanılarak elde edilen yarıçap oranı, kılcal boru çapı ve devir sayısı değerleri deneysel ve teorik bulgulara yakın sonuç vermiştir.

Eksenel pistonlu pompa veya motorların tasarımında önemli bir eleman olan kaymalı yatakların konstrüksiyonunda, yüzey pürüzlülüğü faktörünün bir matematiksel model olarak ele alınarak tasarım kısıtlaması olarak dâhil edildiğinde teorik olarak gerçeğe yakın sonuçlara ulaşılabilir. Ayrıca, yapay zeka optimizasyon algoritmalarından karınca koloni algoritması, parçacık sürüşü optimizasyonu, yapay ısı işlem, tabu araştırma algoritması ve yapay bağışıklık algoritması yöntemleri kullanılarak optimizasyonun mukayese alanı genişletilebilir.

### Kaynaklar

- [1] Koç E, Canbulut F. Eksenel hidrostatik – hidrodinamik yatak deney düzeneği tasarımı ve imalatı. ODTÜ Ankara 1990; 561-570, 19-21 Eylül.
- [2] Koç E, Canbulut, F, Canbulut F. Hidrostatik eksenel kaymalı yatakların teorik ve deneysel analizi- sistem rijitliği. Mühendis ve Makina 1991; Cilt-38 Sayı:444.
- [3] Koç F, Kaymalı Yataklarda Yüzey Pürüzlülüğünün Yağlamaya Etkilerinin Deneysel Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, Kayseri. 1996.
- [4] Canbulut F. The experiment analyses of the effects of the geometric and working parametres on the circular hydrostatic thrust bearings. International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing 2005; 48(4), 715-722.
- [5] Solmaz E, Eksenel Hidrostatik Kaymalı Yatakların Optimum Tasarımı. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2000.
- [6] He S, et al. An improved particle swarm optimizer for mechanical desing optimization problems, engineering optimization. Engineering Optimization 2004; 36(5), 585-605.
- [7] Saruhan H, et al. Design optimization of tilting pad journal bearing using genetic algoritm. International Journal of Rotating Machinery 2004; 10(4),s: 301-307.
- [8] Uysal Ü, Dairesel Cepli Hidrostatik Yataklarda Kayma Yüzeyindeki Sıcaklık Dağılımının Teorik ve Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 1993.
- [9] Corbera S, Olazagoitia, JL, & Lozano JA. Multi-objective global optimization of a butterfly valve using genetic algorithms. ISA Transactions 2016; 63, 401-412.
- [10] Wen J, Yang H, Tong X, Li K, Wang S, & Li Y. Optimization investigation on configuration parameters of serrated fin in plate-fin heat exchanger using genetic algorithm. International Journal of Thermal Sciences 2016; 101, 116-125.
- [11] Canbulut F, Eğik Plakalı Eksenel Pistonlu Pompalarda Hidrostatik Hidrodinamik Prensipli Pabuçların Teorik ve Deneysel Analizi. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 1990.
- [12] Erdoğan HB, Dairesel Cepli Hidrostatik Eksenel Kaymalı Yatakların Performansında Etkili Olan Parametrelerin Optimum Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2008.
- [13] Akkurt M. Makine Elemanları-İkinci Cilt. İstanbul: İTÜ, 1980; s: 141-170.
- [14] Karaboğa D. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları. Ankara: Atlas Yayın-Dağıtım, Yayın No:38, 2004.
- [15] Bhoskar MT, Kulkarni MOK, Kulkarnim MNK, Patekar MSL, Kakandikar GM & Nandedkar VM. Genetic algorithm and its applications to mechanical engineering: A review. Materials Today: Proceedings 2015; 2(4-5), 2624-2630.
- [16] Kaveh A, ve Ghazaan MI. Enhanced whale optimization algorithm for sizing optimization of skeletal structures. Mechanics Based design of structures and Machines 2017; 45(3), 345-362.
- [17] Tosun E, Frezeleme İşlemlerinde Genetik Algoritma Yaklaşımı ile Kesme Koşullarının Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2006.
- [18] Düzgün S, Tornalamada İşlem Parametrelerinin Optimizasyonunda Genetik Algoritma Çalışmaları ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.

## Elektrikli Araçlarda Kullanılan Silindirik Lityum İyon Bataryaların Soğutulmasının Parametrik İncelenmesi

Ali CELEN<sup>1\*</sup>, Muhammet Yasin KABA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Erzincan, Türkiye

\* alicelen@erzincan.edu.tr, mykaba@yahoo.com

(Geliş/Received: 28/04/2020;

Kabul/Accepted: 21/10/2020)

**Öz:** İçten yanmalı motorlara sahip araçlarla kıyaslandıklarında çevreci olmaları sebebiyle elektrikli araçlar ön plana çıkmaya başlamıştır. Elektrikli araçların bataryalarının performansına ve ömrüne etki eden parametrelerden birisi de batarya çalışma sıcaklığıdır. Bataryaların istenilen sıcaklık seviyesinde tutulması için havayla soğutma, sıvıyla soğutma, ısı borusuyla soğutma, faz değiştiren malzemeyle soğutma ve termoelektrik ile soğutma gibi farklı soğutma yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryalardan oluşan 10x10 şeklinde dizilmiş bir batarya grubu göz önüne alınmış ve bataryaların havayla ve elektriksel olarak yalıtılan sıvıyla (Novec 7200) soğutulması parametrik olarak incelenmiştir. Akışkan giriş sıcaklığının (15°C-35°C), farklı deşarj hızlarında bataryada meydana gelen ısı üretiminin (2-6 W) ve Reynolds sayısının (22559-67678) ortalama batarya sıcaklığına ve basınç kaybına etkisi araştırılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonunda hava sıcaklığının 15°C üzerine çıktığı hava şartlarında doğrudan soğutmanın yeterli olmadığı bu sebeple sıvı soğutmanın kullanılmasının gerekli olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, sabit Reynolds sayılarında hava ve sıvı soğutma kullanımı ile ortaya çıkacak basınç kayıpları hesaplanmıştır. Sabit Reynolds sayıları için sıvı hızının hava hızından daha düşük olması sebebiyle, hava ve sıvı soğutma şartlarında basınç kaybında ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir.

**Anahtar kelimeler:** Batarya soğutma, hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, batarya ısıl yönetimi, elektrikli araçlar.

## Parametric Investigation of Cooling of Cylindrical Lithium Ion Batteries Used in Electric Vehicles

**Abstract:** Electric vehicles have come to the forefront compared to vehicles having internal combustion engines since they are environmentally friendly. One of the parameters affecting electric vehicle battery performance is battery operation temperature. Different cooling methods such as air cooling, liquid cooling, heat pipe cooling, phase change material cooling and thermoelectric cooling are used in order to maintain battery temperature in desired temperature. In this study, a battery group which composed of cylindrical lithium ion batteries arranged as 10x10 is considered and cooling of the batteries with air and dielectric fluid (Novec 7200) is investigated parametrically. Effect of fluid inlet temperature (15°C-35°C), battery heat generation during different discharge rates (2-6 W) and Reynolds number (22559-67678) on average battery temperature and pressure drop is researched. According to calculation results, air cooling is not sufficient for the conditions for air having temperature more than 15°C, so it is stated that the usage of liquid cooling is necessary. In addition, pressure drop which occurred with usage air and liquid cooling is estimated. Since liquid velocity is lower than air velocity for constant Reynolds numbers, it is observed that there is no significant change in pressure drop air and liquid cooling conditions.

**Key words:** Battery cooling, air cooling, liquid cooling, battery thermal management, electric vehicle.

### 1. Giriş

Günümüzde ulaşım sektöründe kullanılan araçlar küresel ısınmaya yol açan sera gazı emisyonlarının en önemli sebeplerinden biri haline gelmiştir. İçten yanmalı motorların kullanıldığı araçlar çevreye karbondioksit, karbonmonoksit, hidrokarbonlar, nitrojen oksitler ve su yaymaktadır. Elektrikli araçların küresel sera gazı salınımının düşürülmesi adına bir çözüm sağlayacak olması araştırmacıları bu konuda çalışmaya yönlendirmiştir. Elektrikli araçların kullanılmasıyla egzoz emisyonları düşük ve sessiz bir ortam sağlanmasının yanı sıra içten yanmalı motorlara kıyasla daha düşük maliyetli işletme koşullarına sahip araçların geliştirilmesi planlanmaktadır [1].

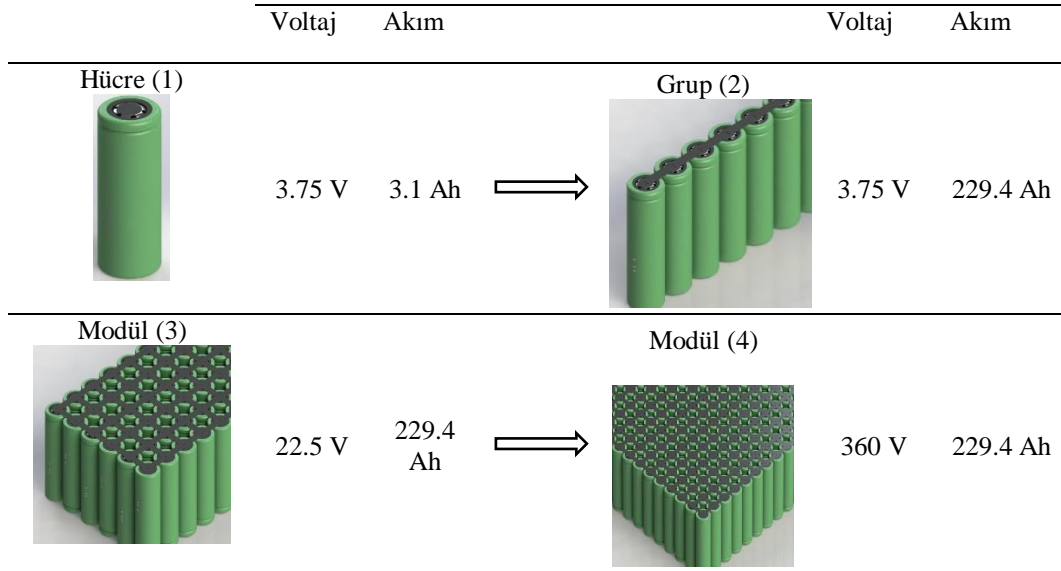
Ülkemizde 2015, 2016, 2017, 2018 yıllarında sırasıyla 106, 950, 4451, 3876 adet hibrit araç satılmış olup aynı yıllarda %100 elektrikli araç satışı sırasıyla 119, 44, 77, 155 olarak belirlenmiştir [2]. Bu durum ülkemizde hibrit araçların elektrikli araçlara kıyasla daha çok tercih edildiğini göstermektedir.

Elektrikli araçlar genel olarak büyük hacim kaplayan bir batarya paketi, elektrik motoru ve rejeneratif frenleme sisteminden oluşurken, hibrit araçlar ise küçük hacim kaplayan bir batarya paketi elektrik motoru,

\* Sorumlu yazar: [alicelen@erzincan.edu.tr](mailto:alicelen@erzincan.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1\*</sup> 0000-0003-3593-5183, <sup>1</sup> 0000-0001-7880-7259

rejeneratif frenleme sistemi, içten yanmalı bir motor ve yakıt tankından oluşmaktadır. Hibrit araçlarda elektrik güçlerine göre mikro hibrit, küçük hibrit, tam hibrit ve şarjlı hibrit olarak sınıflandırılmaktadır [3].

Bir elektrikli aracı oluşturan en önemli elemanlardan birisi bataryadır, bu sebeple uygun batarya tipinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Farklı batarya tipleri göz önüne alındığında kurşun asit, nikel-kadmiyum, nikel-metal hibrit, lityum iyon, lityum iyon polimer, lityum iyon fosfat, çinko hava, lityum sülfür ve lityum hava tipi bataryalar elektrikli araçlarda kullanılacak bataryalar olarak ön plana çıkmaktadırlar. Bu bataryalar arasında lityum iyon bataryalar yüksek enerji yoğunluğu (118-250 Wh/kg), yüksek hacimsel enerji yoğunluğu (200-400 Wh/L), yüksek özgül güç (200-430 W/kg), yüksek çevrim ömrü (2000) ve uygun çalışma sıcaklığı (-20-60°C) gibi özellikleri ile elektrikli araçlarda kullanılması en uygun batarya olarak görülmektedir [4]. Elektrikli araçlarda kullanılan lityum iyon bataryalar genellikle silindirik veya prizmatik geometrik özelliklere sahip olup birbirlerine seri veya paralel bağlanarak gruplar, modüller ve batarya paketleri oluşturulmaktadır. Hücre olarak adlandırılan tekli bataryaların birbirlerine bağlanmasıyla gruplar, grupların birbirlerine bağlanmasıyla modüller, modüllerin birbirlerine bağlanmasıyla ise batarya paketleri oluşmaktadır. Şekil 1’de silindirik lityum iyon batarya kullanılarak oluşturulan Tesla marka araca ait batarya paketi görülmektedir. Şekil 1’den görüleceği üzere, bir adet batarya 3.75 V gerilime, 3.1 Ah akıma ve 11.625 Wh güce sahiptir. 74 adet pilin birbirine paralel bağlanması sonucu bir adet grup oluşur ve bu grup 3.75 V gerilime, 229.4 Ah akıma ve 860.25 Wh güce sahiptir. 6 adet grubun birbiri arasında seri bağlanması sonucu bir adet modül oluşur ve bu modül 22.5 V gerilime, 229.4 Ah akıma ve 5161.5 Wh güce sahiptir. 16 adet modülün birbirleri arasında seri bağlanması sonucu bir adet batarya paketi oluşur ve bu batarya paketi 360 V gerilime, 229.4 Ah akıma ve 82584 Wh güce sahiptir [5].



Şekil 1. Elektrikli araçlarda batarya paketi oluşumunun şematik gösterimi

Bataryaların performansını, ömrünü, güvenliğini ve maliyetini etkileyen parametrelerden birisi de çalışma sıcaklığıdır. Lityum iyon bataryalar için uygun çalışma sıcaklığı 15 °C-40°C arasında olduğu ortaya konulmuştur [6]. Uygun çalışma şartlarını sağlamak için yapılan batarya ısı yönetimi çalışmaları incelendiğinde hava ile soğutma, sıvı ile soğutma, ısı borusu ile soğutma, faz değiştiren malzeme ile soğutma ve termoelektrik soğutma gibi farklı yöntemler olduğu görülmektedir. Bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1’de verilmiştir [7]. Uygulamada bu yöntemler arasında en çok sıvı ve hava ile soğutma kullanılmaktadır. Düşük ısı yüklerinde sıvı soğutma ile kıyaslandığında düşük özgül ısınma ısısı ve verim dezavantajlarına rağmen doğrudan temas, hafiflik, kolay bakım ve düşük maliyet özellikleri ile hava ile soğutma avantajlı hale gelebilmektedir. Yüksek ısı yüklerinde ise havaya kıyasla yüksek soğutma kapasitesi ile sıvı soğutma ön plana çıkmaktadır.

Literatürdeki silindirik lityum iyon bataryaların hava ve sıvı ile soğutulması üzerine yapılan deneysel ve nümerik çalışmaların bazıları şöyle özetlenmiştir:

Park ve Jung [8] silindirik lityum iyon bataryaların soğutulmasında hava ve sıvı (mineral yağ) kullanımının tasarım ve enerji tüketimine etkisini araştırmışlardır. Hava ile soğutmada geniş batarya modüllerinin kullanımının

**Tablo 1.** Batarya ısııl yöntemlerinin karşılaştırılması [7]

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Hava ile soğutma	Doğrudan temas, hafiflik, kolay bakım	Düşük özgül ısınma ısısı, homojen dağılımı olmaması, düşük verim
Sıvı ile soğutma	Yüksek özgül ısınma ısısı, yüksek verim	Yüksek maliyet, kaçak sorunu, karmaşık yapı
Isı borusu ile soğutma	Yüksek ısııl iletkenlik, yüksek verim	Yüksek maliyet, karmaşık yapı
Faz değıştiren ile malzeme soğutma	Düşük maliyet, homojen sıcaklık dağılımı, yüksek verim	Düşük ısııl iletkenlik, kaçak sorunu
Termoelektrik ile soğutma	Hareketsiz ve sessiz olması, Bakım maliyeti düşük, uzun ömürlü	Düşük verim, ek güç ihtiyacı

sıvı soğutmada ise dar batarya modüllerinin kullanımının uygun olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yüksek ısııl yüklerde hava soğutmalı bataryaların sıvı soğutmalı bataryalara kıyasla daha fazla güç tükettiğini belirtmişlerdir. Hava soğutmanın düşük ısııl yüklerde kullanımının uygun olduğu belirtmişler ve yüksek ısııl yüklerde sıvı soğutmanın daha etkin bir yöntem olarak kullanılmasını önermişlerdir.

Li vd. [9] silindirik lityum iyon bataryaların hava ile soğutulmasını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Batarya paketi içerisindeki sıcaklık dağılımını farklı çalışma şartları için belirlemiş ve en sonda bulunan bataryaların sıcaklıklarının diğerlerine oranla yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu sebeple sıcaklık tahmini için iki bölgeli bir modelin kullanılmasının daha doğru sonuç vereceğini ifade etmişlerdir.

Wang vd. [10] farklı şekillerde dizilmiş bataryalardan oluşan modülün ısııl performansını sayısal olarak araştırmışlardır. Kübik ve altıgen şekilde dizilmiş batarya modüllerinin dikdörtgen ve dairesel şekilde dizilenlere kıyasla daha etkin bir şekilde soğutulabildiklerini gözlemlemişlerdir. Ayrıca fanın konumlandırılmasının soğutmaya etkisinin de incelendiği çalışmada fanın batarya modülünün üst kısmına konumlanması durumunda en iyi soğutmanın sağlandığı ifade etmişlerdir.

Yang vd. [11] sıralı ve şaşırtmalı olarak dizilmiş silindirik lityum iyon pillerin hava ile soğutulmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Piller arasındaki enine ve boyuna mesafelerin batarya paketi sıcaklığı üzerine etkisi incelenmiş olup, piller arasındaki boyuna (akış yönünde) mesafelerin artmasıyla ve enine mesafelerin azalmasıyla ortalama batarya sıcaklığının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Homojen sıcaklık dağılımı ve güç gereksinimleri göz önüne alındığında bataryalar arasındaki en uygun enine ve boyuna mesafelerin sırasıyla 34 mm ve 32 mm olarak önermişlerdir.

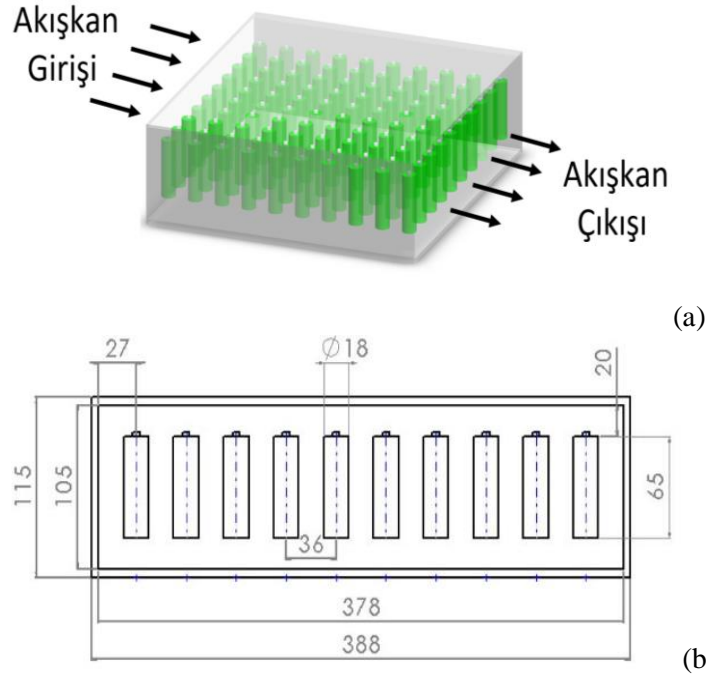
Saw vd. [12] lityum iyon pillerden oluşan batarya paketinin hava ile soğutulmasını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada 38120 tip batarya kullanılmış olup, 24 adet pilden oluşan batarya paketi oluşturulmuş, pillerin farklı deşarj akımlarında soğutulması durumunda ortaya çıkan ısı ve pillere ait yüzey sıcaklıkları belirlenmiştir. Bunlara ek olarak Nusselt sayısının tahmini için korelasyon geliştirilmişlerdir.

Jiaqiang vd. [13] hava giriş/çıkışı konumlarının ve batarya içerisine yerleştirilen yönlendirme plakasının batarya paketinin soğutulmasına etkisi incelemişlerdir. Havanın batarya modülünün ön yüzünden girip arka yüzünden çıkması haline en uygun sıcaklık dağılımına ulaşılabileceğini belirtmişlerdir. Buna ek olarak, yönlendirme plakasının kullanımıyla havanın batarya ve batarya kabı arasına girmesi önlenmiş ve soğutma performansı artırılmışlardır.

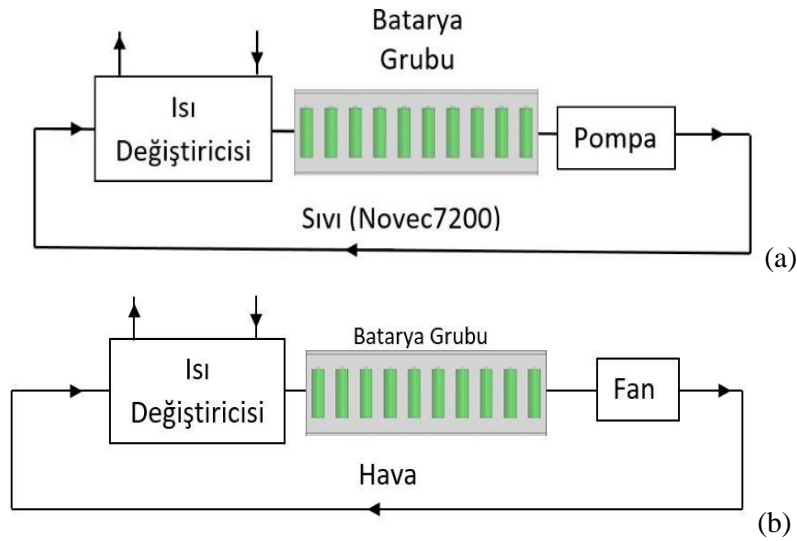
Shahid ve Agelin-Chaab [14] batarya paketine farklı şekillerde ikincil hava girişleri eklenmesi ile sıcaklık dağılımının homojenliğini iyileştirmek için tasarımlar yapmışlar ve sıcaklık dağılımını sayısal olarak incelemişlerdir. İkincil hava girişinin üstten olduğu tasarım sayesinde ortalama batarya paketi ve ortalama maksimum sıcaklıkların sırasıyla %9 ve %4 azaldığı görülmüştür. Yeni tasarım ile havanın karışımı ve türbülans sağladığı için homojen sıcaklığı dağılımında %39 iyileşme sağlanmışlardır.

Fan vd. [15] sıralı, şaşırtmalı ve çapraz şekilde dizilmiş silindirik lityum iyon bataryalarda hava giriş sıcaklığının ve batarya deşarj hızının batarya ısıl yönetimine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Soğutma etkinliği ve homojen sıcaklık dağılımı göz önüne alındığında sıralı dizilimin en uygun tasarım olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak, çapraz dizilim ile karşılaştırıldığında sıralı dizilimde %23 daha az basınç kaybı olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan 18650 tip silindirik lityum iyon bataryalardan oluşan ve 10x10 şeklinde dizilmiş batarya grubunun hava ve elektriksel olarak yalıtkan olan sıvı (Novec 7200) ile soğutulması durumunda ortalama sıcaklığın ve ortaya çıkacak basınç kaybının belirlenmesi amaçlanmıştır. Batarya grubu ve batarya grubuna ait geometrik büyüklükler sırasıyla Şekil 2(a) ve Şekil 2(b)'de, batarya grubunun soğutulması



Şekil 2. Batarya grubu ve batarya grubuna ait geometrik büyüklüklerin şematik gösterimleri



Şekil 3. Batarya grubu, batarya grubuna ait geometrik büyüklükler, hava ve sıvı soğutma sistemlerinin şematik gösterimleri

için göz önüne alınan doğrudan temaslı hava ve sıvı temaslı soğutma sistemleri sırasıyla Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de verilmiştir. Batarya grubunda akışkan giriş sıcaklığının (15°C-35°C), farklı deşarj hızlarında bataryada meydana gelen ısı üretiminin (2-6 W) ve Reynolds sayısının (22559-67678) ortalama batarya sıcaklığı ve basınç düşümü üzerine etkisi parametrik olarak araştırılmıştır.

## 2. Hesaplamalar

Silindirik bir batarya göz önüne alındığında üretilen toplam ısı üst, yan ve alt yüzeylerden taşınım yoluyla transfer edilir ve şöyle hesaplanır:

$$\dot{Q}_{batarya} = \dot{Q}_{üst} + \dot{Q}_{yan} + \dot{Q}_{alt} \quad (1)$$

Üst ve alt yüzeyler simetrik olduğundan bu yüzeylerden transfer edilen ısı eşit olup şöyle hesaplanır:

$$\dot{Q}_{üst} = \dot{Q}_{alt} = \bar{h}_u A_u (T_{akışkan} - \bar{T}_{pil}) \quad (2)$$

Üst ve alt yüzeylerdeki Reynolds sayısı şöyle tanımlanır:

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} \quad (3)$$

Buradaki karakteristik uzunluk batarya paketindeki bataryaların bir sıradaki uzunluğu olup  $L=(nD+(ST-D)(n-1))$  şeklinde tanımlanır.

Üst ve alt ortalama yüzeylerdeki ısı taşınım katsayısı aşağıdaki Nusselt denklemlerinden biri kullanılarak  $Re_L < 5 \times 10^5$  ve  $5 \times 10^5 < Re_L < 10^7$  aralıkları için sırasıyla şöyle hesaplanır [16]:

$$h = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} = 0.664 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad (4)$$

$$h = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} = 0.037 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad (5)$$

Yan yüzeyden transfer edilen ısı eşit olup şöyle hesaplanır:

$$\dot{Q}_{yan} = \bar{h}_y A_y (T_{akışkan} - \bar{T}_{batarya}) \quad (6)$$

Yan yüzeylerdeki maksimum hız ve Reynolds sayısı sırasıyla şöyle tanımlanır:

$$V_{maks} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (7)$$

$$Re_L = V_{maks} \frac{L}{\nu} \quad (8)$$

Yan yüzeylerdeki ortalama ısı taşınım katsayısı aşağıdaki Nusselt denklemlerinden biri kullanılarak  $0 < Re_D < 100$ ,  $100 < Re_D < 1000$ ,  $1000 < Re_D < 2 \times 10^5$  ve  $2 \times 10^5 < Re_D < 10^6$  aralıkları için sırasıyla şöyle hesaplanır [16]:

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (9)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (10)$$



$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (11)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25} \quad (12)$$

Denklemler ortalama batarya sıcaklığını elde etmek için düzenlenirse şu hale gelir:

$$\bar{T}_{batarya} = T_{akışkan} - \frac{\dot{Q}_{batarya}}{\pi k (\overline{Nu}_D H + \overline{Nu}_L D/2)} \quad (13)$$

Batarya grubunda meydana gelen basınç kaybı ise şöyle hesaplanır (Cengel 2014):

$$\Delta P = N_L f X \frac{\rho V_{maks}^2}{2} \quad (14)$$

Burada f sürtünme faktörü olup boru demetleri için sürtünme faktörü grafiklerinden Reynolds sayısına göre belirlenmiştir [16]. Düzeltme faktörü kare dizilim için 1 olarak kabul edilmiş olup  $N_L$  ise batarya sıra sayısıdır.

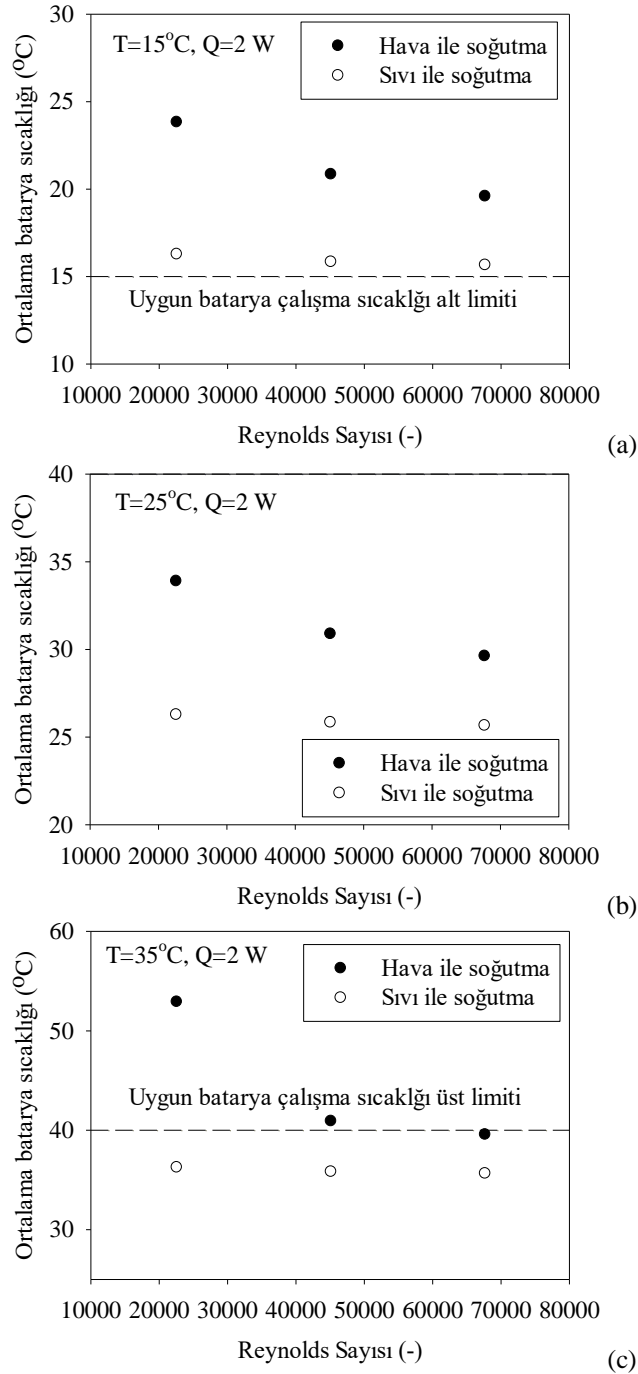
### 3. Bulgular

Ortalama batarya sıcaklığının hesaplanması için Denklemler (1)-(14) kullanılmış olup sabit Reynolds sayılarında akışkanların soğutma performansı belirlenmiştir. Hesaplamalarda göz önüne alınan Reynolds sayıları, akışkan hızları, kütle ve hacimsel debiler Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Çalışmada kullanılan akışkanlara ait Reynolds sayıları, akışkan hızı, kütle ve hacimsel debi değerleri

Grup	Değişken	Birim	Hava	Sıvı
1	Reynolds sayısı	-	22559	22559
	Hız	m/s	1	0.027
	Kütleli debi	kg/s	0.047	1.53
	Hacimsel Debi	m <sup>3</sup> /s	0.039	0.011
2	Reynolds sayısı	-	45118	45118
	Hız	m/s	2	0.054
	Kütleli debi	kg/s	0.0956	3.066
	Hacimsel debi	m <sup>3</sup> /s	0.070	0.022
3	Reynolds sayısı	-	67678	67678
	Hız	m/s	3	0.081
	Kütleli debi	kg/s	0.14	4.598
	Hacimsel debi	m <sup>3</sup> /s	0.11	0.032

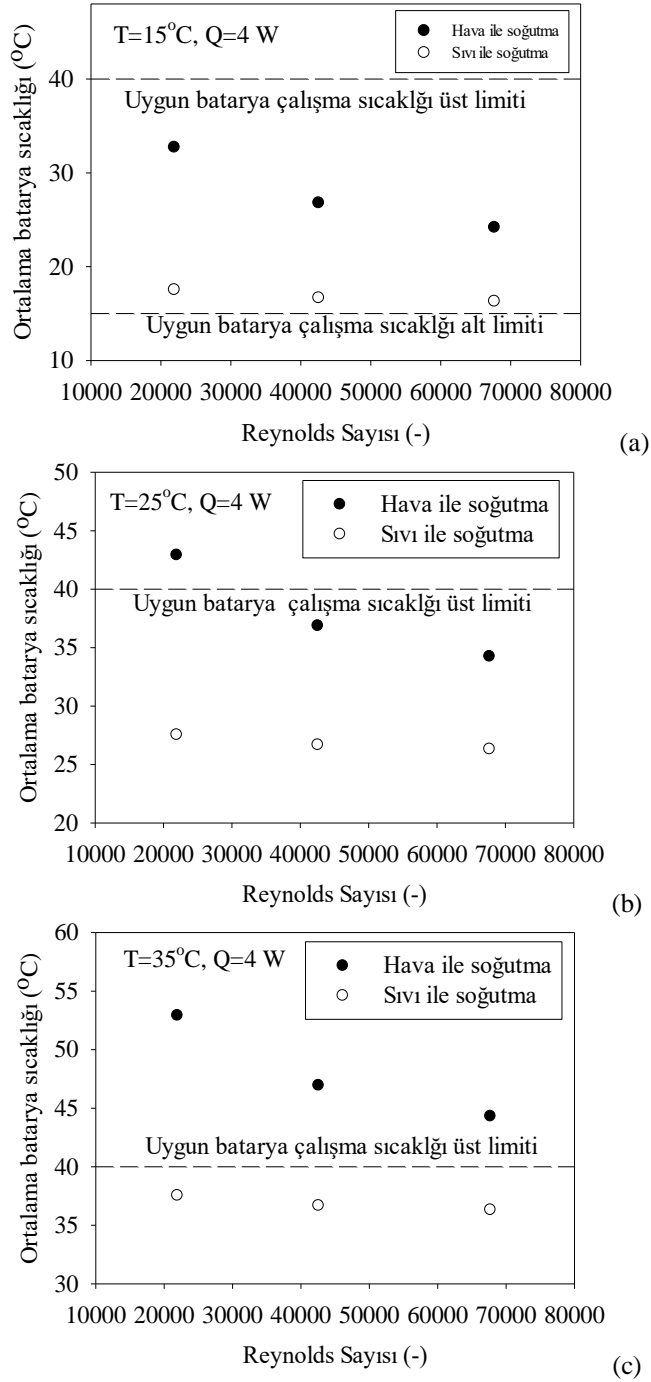
Hava ve sıvı giriş sıcaklıklarının 15°C, 25°C, 35°C ve batarya başına ısı üretiminin 2 W olduğu şartlarda ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 4(a), Şekil 4(b) ve Şekil 4(c)’de verilmiştir. Bataryanın düşük deşarj hızında çalıştığını ve düşük miktarda gücün çekildiği durumu temsil eden 2 W’lık ısı üretim değerinde hava ve sıvı ile soğutmada akışkan giriş sıcaklıklarının 15°C ve 25°C olduğu durumlarda bataryaların istenilen çalışma sıcaklığı aralığında tutulabildiği görülmektedir. Hava giriş sıcaklığının 35°C olduğu durumda ise hava ile soğutmanın yeterli olmadığı ve sıvı ile soğutmanın ise limit değerini biraz üstünde yer aldığı görülmektedir. Buna ek olarak, artan akışkan hızı dolayısıyla Reynolds sayısı artışı ile hava ile soğutmada ortalama batarya sıcaklığında ciddi düşüşler görülürken sıvı ile soğutma durumunda ortalama batarya sıcaklığının neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Ortalama batarya sıcaklıklarındaki en fazla sıcaklık farkının düşük akışkan hızlarında



**Şekil 4.** Batarya başına 2 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi a)  $T_{akışkan,giriş}=15^{\circ}C$ , b)  $T_{akışkan,giriş}=25^{\circ}C$ , c)  $T_{akışkan,giriş}=35^{\circ}C$

olduğu gözlemlenmektedir. Maksimum sıcaklık düşümünün Şekil 4(a), Şekil 4(b) ve Şekil 4(c) için sırasıyla %20-%32, %13-%22 ve %10-%31 aralığında olduğu belirlenmiştir.

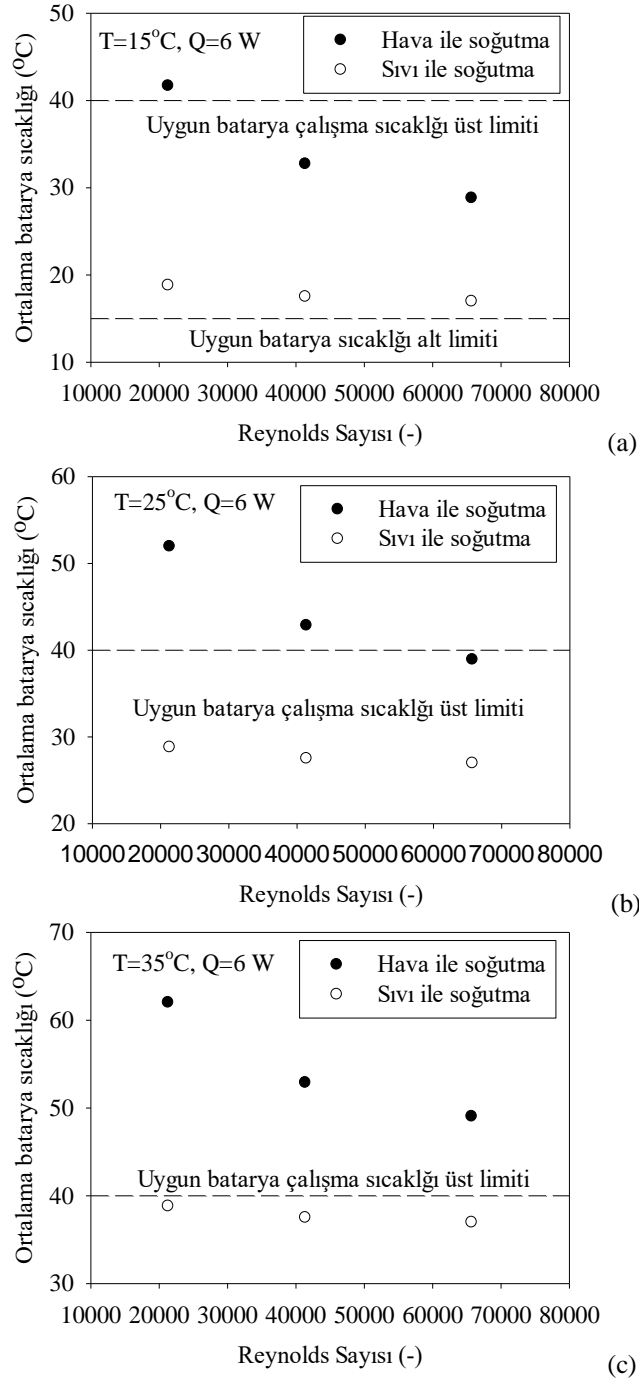
Hava ve sıvı giriş sıcaklıklarının  $15^{\circ}C$ ,  $25^{\circ}C$ ,  $35^{\circ}C$  ve batarya başına ısı üretiminin 4 W olduğu şartlarda ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 5(a), Şekil 5(b) ve Şekil 5(c)'de verilmiştir. Bataryanın orta deşarj hızında çalıştığı durumu temsil eden orta gücün çekildiği durumu temsil eden 4 W'lık ısı üretim değerinde sadece  $15^{\circ}C$  ve  $25^{\circ}C$  giriş sıcaklıklarında hava ve sıvı soğutma ile bataryaların istenilen çalışma sıcaklığında tutulabildiği görülmüştür. Akışkan giriş sıcaklığının  $35^{\circ}C$  olması durumunda hava soğutmanın yeterli olmadığı soğutmanın sıvı soğutma şeklinde yapılması gerektiği görülmüştür. Maksimum



**Şekil 5.** Batarya başına 4 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi a)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$ , b)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$ , c)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

sıcaklık düşümünün Şekil 5(a), Şekil 5(b) ve Şekil 5(c) için sırasıyla %33-%46, %23-%36 ve %18-29 aralığında olduğu belirlenmiştir.

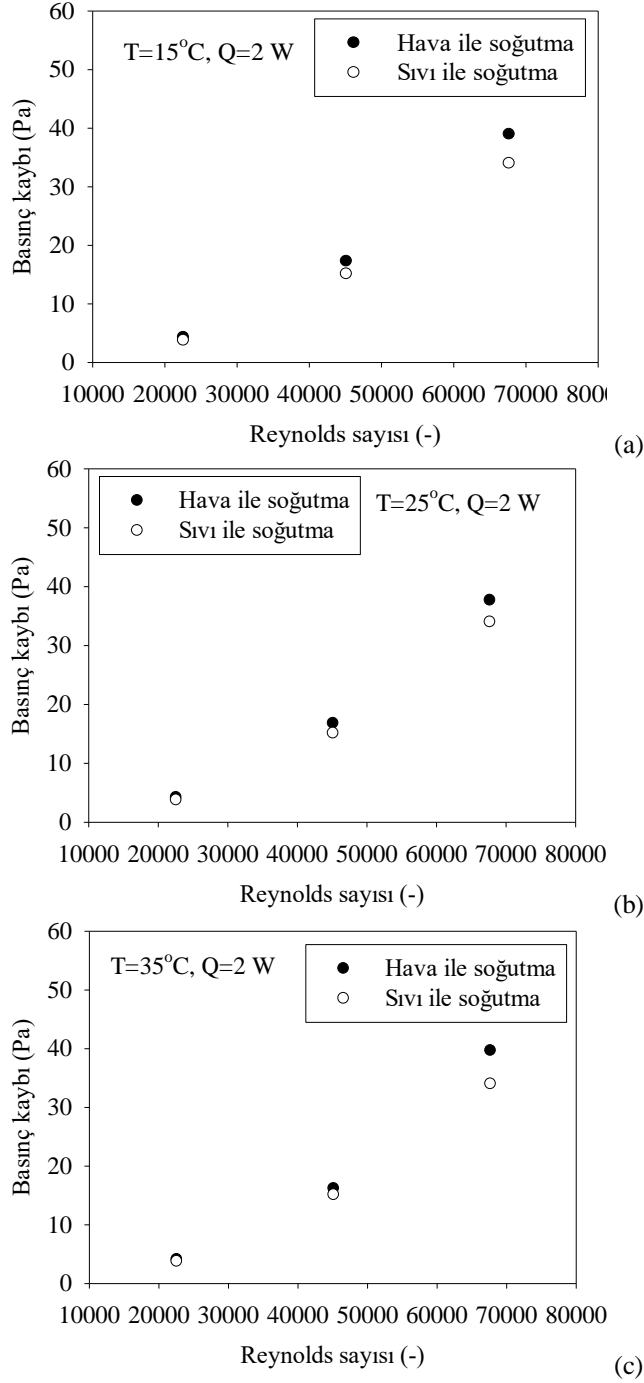
Hava ve sıvı giriş sıcaklıklarının  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$  ve batarya başına ısı üretiminin 6 W olduğu şartlarda ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi sırasıyla Şekil 6(a), Şekil 6(b) ve Şekil 6(c)'de verilmiştir. Bataryanın yüksek deşarj hızında çalıştığını ve dolayısıyla yüksek miktarda gücün çekildiği durumu



**Şekil 6.** Batarya başına 6 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için ortalama batarya sıcaklığının Reynolds sayısı ile değişimi a)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$ , b)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$ , c)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

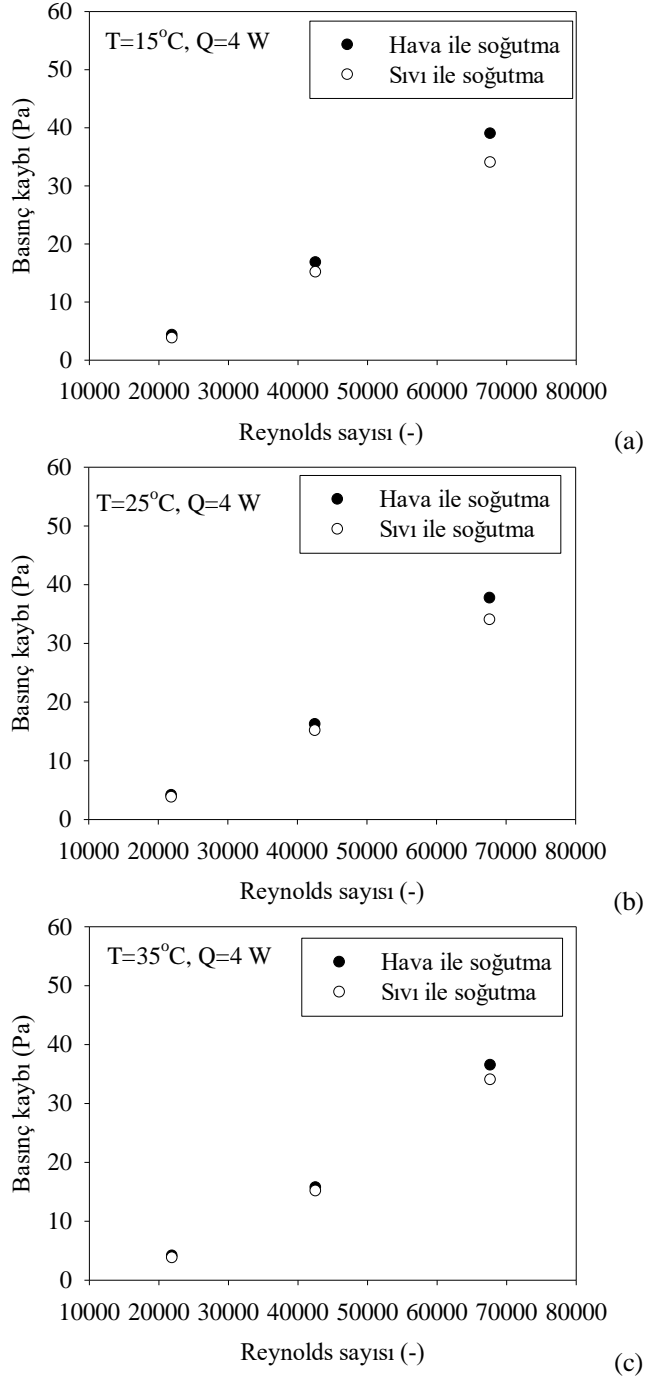
temsil eden ortalama gücün çekildiği durumu temsil eden 6 W'lık ısı üretim değerinde sadece 15°C giriş sıcaklığında en düşük hava hızı değeri dışında bataryaların istenilen çalışma sıcaklığında tutulabildiği görülmüştür.

Akışkan giriş sıcaklığında 25°C ve 35°C olduğu durumlarda sadece sıvı soğutma yeterli olurken hava soğutmanın yetersiz olduğu görülmüştür. Ortalama batarya sıcaklıklarındaki en fazla sıcaklık farkının düşük akışkan hızlarında olduğu durumda gözlemlenmektedir. Maksimum sıcaklık düşümünün Şekil 6(a), Şekil 6(b) ve Şekil 6(c) için sırasıyla %41-55, %31-%45 ve %25-%37 olduğu belirlenmiştir.



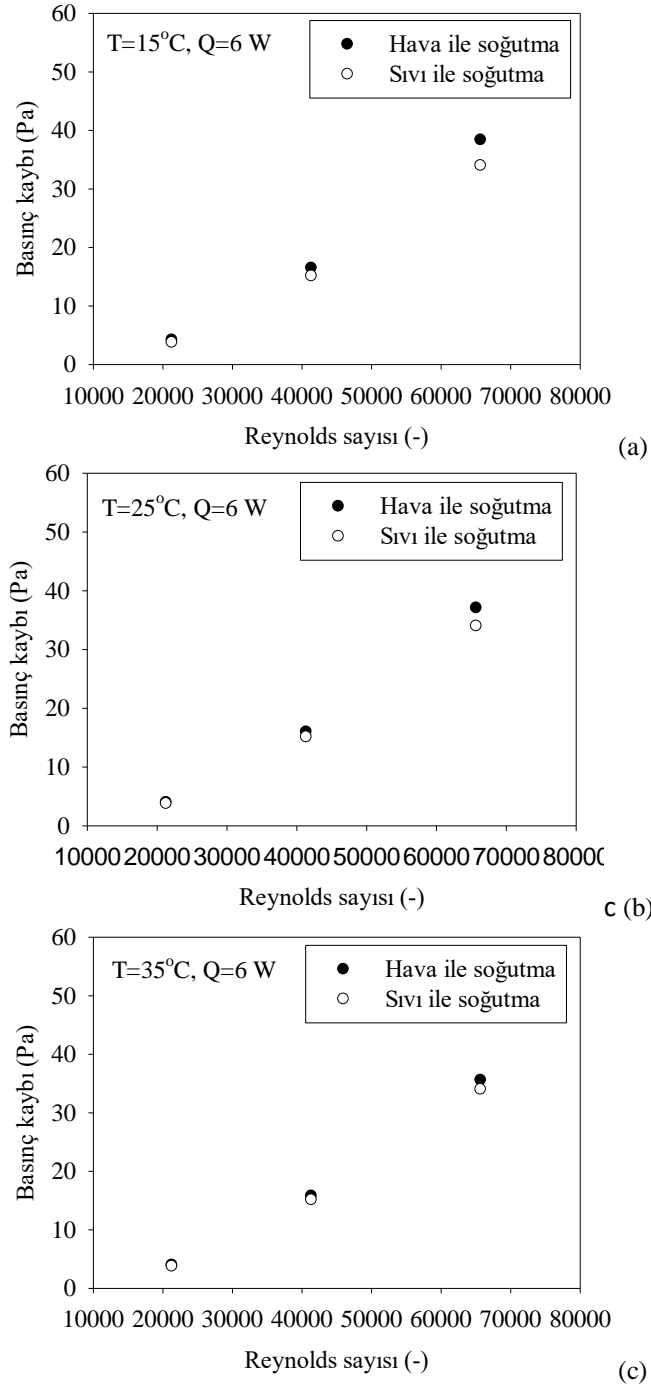
**Şekil 7.** Batarya başına 2 W'lik ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için basınç kaybının Reynolds sayısı ile değişimi a)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$ , b)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$ , c)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

Bataryaların soğutulmasında ısı transferi açısından bakıldığında sıvı soğutmanın hava soğutmaya kıyasla daha başarılı olduğu görülmektedir ancak yapılacak tasarımda kullanılan akışkan ile ortaya çıkacak basınç kaybının da belirlenmesi önemlidir. Bu sayede sistemde kullanılacak fan veya pompanın kapasiteleri uygun olarak belirlenebilir. Göz önüne alınan çalışma şartları için hava ve sıvı soğutma kullanılması durumunda batarya grubunda ortaya çıkacak basınç kayıpları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere, sıvı soğutma ile ortaya çıkacak basınç kaybının hava soğutmayla karşılaştırıldığında çok az da olsa düşüktür. Bu



**Şekil 8.** Batarya başına 4 W'lik ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için basınç kaybının Reynolds sayısı ile değişimi a)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$ , b)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$ , c)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

durum yoğunluğu ve viskozitesi daha yüksek olan sıvı akışkan kullanmasına rağmen, sıvı akışkanın havaya kıyasla daha düşük hızlarda kullanılması olarak açıklanabilir.



**Şekil 9.** Batarya başına 6 W'lık ısı üretimi ve farklı akışkan giriş sıcaklıkları için basınç kaybının Reynolds sayısı ile değişimi a)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=15^{\circ}\text{C}$ , b)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=25^{\circ}\text{C}$ , c)  $T_{\text{akışkan,giriş}}=35^{\circ}\text{C}$

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Elektrikli araçlarda kullanılan silindirik lityum iyon bataryaların hava ve elektriksel olarak yalıtılan olan sıvı akışkan Novec 7200 ile soğutulması durumunda ortalama batarya sıcaklığının ve ortaya çıkacak basınç kaybının araştırıldığı bu parametrik çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sıvı ile soğutmada ortalama batarya sıcaklıkları hava ile soğutmaya kıyasla daha düşük olmaktadır.

- Düşük akışkan giriş sıcaklıklarında veya batarya ısı yüklerinde hava soğutma yeterli olmaktadır. Yüksek akışkan giriş sıcaklıklarında veya batarya ısı yüklerinde hava soğutma yeterli olmazken sıvı soğutma ile batarya uygun çalışma sıcaklıklarında tutulabilir.
- Batarya başına 2 W'lık ısı üretimi durumunda hava soğutma yerine sıvı soğutma kullanılarak ortalama batarya sıcaklığında maksimum %32'lik bir azalma meydana gelmektedir.
- Batarya başına 4 W'lık ısı üretimi durumunda hava soğutma yerine sıvı soğutma kullanılarak ortalama batarya sıcaklığında maksimum %46'lık bir azalma meydana gelmektedir.
- Batarya başına 6 W'lık ısı üretimi durumunda hava soğutma yerine sıvı soğutma kullanılarak ortalama batarya sıcaklığı maksimum %55'lik bir azalma meydana gelmektedir.
- Sıvı soğutma ile ortaya çıkacak basınç kaybı hava soğutmayla karşılaştırıldığında çok az da olsa düşüktür.
- Yüksek akışkan giriş sıcaklıklarında ve batarya ısı yüklerindeki soğutma performansı göz önüne alındığında sıvı soğutmanın kullanımının hava soğutmaya kıyasla daha başarılı olduğu görülmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Tie SF, Tan CW. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2013; 20: 82-102.
- [2] [http://tehad.org/wp-content/uploads/2019/07/w-2019-TR\\_ilk-YARI-sat%C4%B1%C5%9F-rakamlar%C4%B1.jpg](http://tehad.org/wp-content/uploads/2019/07/w-2019-TR_ilk-YARI-sat%C4%B1%C5%9F-rakamlar%C4%B1.jpg)
- [3] Dincer I, Hamut HS, Javani N. *Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems*. John Wiley & Sons, 2016.
- [4] Yong, JY, Ramachandaramurthy VK., Tan KM, Mithulananthan, N.. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2015; 49: 365-385.
- [5] Lelie M, Braun T, Knips M, Nordman,H, Ringbeck F, Zappen H, Sauer D. Battery management system hardware concepts: An overview. *Appl. Sci.* 2018; 8(4): 534.
- [6] Wang Q, Jiang B, Li B, Yan, Y. A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2016; 64: 106-128.
- [7] Siddique ARM, Mahmud S, Van Heyst B. A comprehensive review on a passive (phase change materials) and an active (thermoelectric cooler) battery thermal management system and their limitations. *J. Power Sources* 2018; 401: 224-237.
- [8] Park S, Jung D. Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle. *J. Power Sources* 2013; 227: 191-198.
- [9] Li X, He F, Ma L. Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *J. Power Sources* 2013; 238: 395-402.
- [10] Wang T, Tseng KJ, Zhao J, Wei Z. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Appl. Energy* 2014; 134: 229-238.
- [11] Yang N, Zhang X, Li G, Hua D. Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs: A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Appl. Therm. Eng.* 2015; 80: 55-65.
- [12] Saw LH, Ye Y, Tay AA, Chong WT, Kuan SH, Yew MC. Computational fluid dynamic and thermal analysis of lithium-ion battery pack with air cooling. *Appl. Energy* 2016; 177: 783-792.
- [13] Jiaqiang E, Yue M, Chen J, Zhu H, Deng Y, Zhu Y, Zhang F, Wen M, Zhang B, Kang S. Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle. *Appl. Therm. Eng.* 2018; 144: 231-241.
- [14] Shahid S, Agelin-Chaa, M. Development and analysis of a technique to improve air-cooling and temperature uniformity in a battery pack for cylindrical batteries. *Therm Sci Eng Prog* 2018; 5: 351-363.
- [15] Fan Y, Bao Y, Ling C, Chu Y, Tan X, Yang S. Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries. *Appl. Therm. Eng.* 2019; 155: 96-109.
- [16] Cengel Y. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education, 2014.





## Mekanik Olarak Aktive Edilmiş Kırmızı Çamurdan Değerli Metallerin Geri Kazanılması

M. Deniz TURAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
mdturan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 29/04/2020;

Kabul/Accepted: 02/12/2020)

**Özet:** Bu çalışmada, Bayer prosesi ile boksitten alüminyum üretimi sırasında ortaya çıkan kırmızı çamurdan metallerin ekstraksiyonu üzerinde mekanik aktivasyonun etkisi incelenmiştir. Orijinal kırmızı çamur örnekleri ve masa üstü tip yüksek enerji aktarımlı bilyeli bir değirmende mekanik aktivasyona tabi tutulmuş örnekler 25 ve 45 °C'de HCl ile liç edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre artan liç sıcaklığı, artan mekanik aktivasyon süresi ve artan HCl konsantrasyonu ile birlikte metal ekstraksiyon verimlerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca mekanik aktivasyona tabi tutulmuş örneklerin liç işleminde liç süresinin daha etkin olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 30 dk mekanik aktivasyon süresi, 120 dk liç süresi, 400 dev/dk karıştırma hızı, 45°C liç sıcaklığı, 3 M HCl konsantrasyonu ve 25 mL/g sıvı-katı oranında % 100 Al, % 68.51 Ti ve % 15.08 Fe ekstraksiyon verimleri elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** kırmızı çamur, hidrometalurji, mekanik aktivasyon, alüminyum, titanyum.

### Recovery of Precious Metals from Mechanically Activated Red Mud

**Abstract:** In this study, the effect of mechanical activation on the extraction of metals from red mud, which appeared during aluminum production from bauxite by Bayer process, was investigated. Original red mud samples and mechanically activated samples which obtained with grinding in a table type high energy transfer ball mill were leached with HCl at 25 and 45 °C. According to the results obtained, it was determined that metal extraction efficiency increased with increasing leaching temperature, increasing mechanical activation time and increasing HCl concentration. Leaching time was found to be more effective in leaching of samples that were subjected to mechanical activation. Under conditions of 30 min of mechanical activation time, 120 min of leaching time, 400 rpm of stirring speed, 45°C of leaching temperature, 3 M of HCl concentration and 25 mL/g of liquid-solid ratio, extraction yields were obtained as 100% Al, 68.51% Ti and 15.08% Fe.

**Keywords:** red mud, hydrometallurgy, mechanically activation, aluminum, titanium.

### 1. Giriş

Doğada alüminyumun çok çeşitli mineralleri olmasına karşılık, dünya alüminyum üretiminin hemen hemen tamamı boksit cevherlerinden sağlanır. Boksit cevherleri ihtiva ettiği alümina mineralleri bakımından farklı sınıflandırılmaya tabi tutulmuştur. Bu açıdan boksit cevheri alümina ( $Al_2O_3$ ), gibsit ( $\gamma-Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ), böhmüt ( $\gamma-Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) ve diasporit ( $\gamma-Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) alüminyum oksit hidrat minerallerini bulundurabilmektedir [1-2]. Günümüzde boksitten alüminyum üretiminde Bayer prosesi kullanılmaktadır. Bayer prosesi ile alümina üretimi, boksit cevherinin basınçlı bir reaktör sisteminde yüksek sıcaklıkta kostik soda ile muamele edilmesi şeklinde yürütülmektedir. Bayer prosesinde kostik soda ile liç esnasında boksitte bulunan demir katıda kalmakta ve kırmızı çamur adı ile anılmaktadır. Kırmızı çamur, alüminyum üreten tesislerde oldukça fazla miktarda elde edildiğinden dolayı zamanla atık yöntemi gibi çevresel problemleri de beraberinde getirmektedir. Bayer prosesinde bu atığa, kostik rejenerasyonuna tabi tutulmuşsa kahverengi çamur, tutulmamışsa kırmızı çamur (pH 10.0-12.5) adı verilmektedir. Üretilen bir ton alümina veya 0.5 ton alüminyum metaline karşılık yaklaşık olarak bir ton kırmızı çamur (kuru baza göre) oluşmaktadır [3].

Diğer taraftan, kırmızı çamurun depolanması aşağıda verilen problemlere yol açabilmektedir:

- Barajların bakım maliyeti
- Geniş baraj alanlarının satın alınması
- Yaşayan organizmalar için kostik riski
- Barajdan sızıntılar.

Kırmızı çamurun ekonomik olarak işlenmesi konusunda çeşitli metotlar bulunmuş ancak şimdiye kadar pratik bir çözüm geliştirilememiştir. Bu yüzden proses artığı olan kırmızı çamur faydasız bir atık olarak görülmekte ve depolanması her yerde çevresel sorunlara yol açmaktadır. Alümina fabrikaları kırmızı çamurları baraj olarak

isimlendiren göl tipi alanlarda depolamakta, ancak depolama metotları fabrikadan fabrikaya değişmekte ve çoğu çevreye zarar vermektedir [2].

Birçok metal üretim yönteminde öncelikle minerallerin serbestleştirilmesi gerekmektedir. Bunun için çeşitli boyut küçültme işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Balaz vd [4], mekanik aktivasyonu partiküllerin yoğun bir boyut küçültme işlemine tabi tutulması olarak tanımlarken bu esnada kimyasal bazı değişimler gözlemlenirse buna da mekanokimyasal işlemler ismini vermektedir. Yüksek enerjili değirmen sistemleri kullanılması ile meydana gelecek mekanokimyasal dönüşümler partiküllerin aktivitesini arttıracaktır. Mekanik aktivasyonun partikül üzerindeki birincil etkisi tane boyutunda azalma ve buna bağlı olarak yüzey alanında artış meydana gelmesidir. Partikül üzerinde meydana gelen enerji değişimi katılardaki bağ enerjilerinin azalmasını beraberinde getirmektedir. Diğer taraftan, mekanik aktivasyonun ikincil etkisi agregasyon, adsorbsiyon ve yeniden kristallenme olarak tanımlanmaktadır [5, 6]

Kırmızı çamurdan değerli metallerin geri kazanılmasına yönelik yapılan çalışmalarda çoğunlukla hidrometalurjik yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. HCl varlığında çeşitli liç parametrelerinin incelendiği bir çalışmada en yüksek çözünme şartlarında çözeltiye %97 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %52,2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> geçtiği belirtilmektedir [7]. Ayrıca hidroklorik asit ve sitrik asitin kullanıldığı benzer bir çalışmada liç süresinin etkin olmadığı ancak asit konsantrasyonunun sonuç üzerinde oldukça etkin olduğu belirtilmektedir [8]. Diğer taraftan, % 20'den fazla Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren kırmızı çamurdaki alüminanın geri kazanımında alkali ilavesindeki artışa bağlı olarak 1400 °C ye kadar ağırlık kaybında önemli artış olduğu belirtilmektedir [9].

Kırmızı çamurdan alüminanın geri kazanılması üzerine yapılan bir çalışmada soda külü ile sinterlemeyi takiben kostik liç sonucunda alüminanın % 90'dan fazlasının geri kazanıldığı belirtilmektedir [10]. Kırmızı çamurdan çeşitli metallerin geri kazanılması (Fe, Al, Ti, Na, V, Sc ve Ga) ile çevresel açıdan risk potansiyelinin azaltılması [11,12] söz konusu olduğu belirtilmektedir. Yapılan başka bir çalışmada, titanyumun geri kazanılması için iki kademe bir işlem basamağı uygulandığı, sülfürik asit liçini takiben hidroliz ve kalsinasyon işlemlerinin uygulandığı ve %70 TiO<sub>2</sub> kazanımı elde edildiği belirtilmektedir [13]. Kırmızı çamurda en değerli metal olarak görülen titanyumun sülfürik asit liçi ile kazanımının modellenmesi gerçekleştirilmiş liç sıcaklığı, sülfürik asit konsantrasyonu, karıştırma hızı, katı-sıvı oranı ve liç süresi parametrelerinin incelendiği belirtilmektedir [14]. Alüminyumun boksitten veya artıklarından geri kazanılmasında SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı oldukça önemlidir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda çeşitli yöntemlerle silisyumun uzaklaştırılmasıyla alüminyum kazanım oranının arttığı belirtilmektedir [15, 18, 19]. Organik ve mineral asitleri kullanımının liç verimi üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada farklı kombinasyonlarda kullanılan asitler ile alüminyum kazanımının % 96'ya kadar çıktığı belirtilmektedir [20, 21]. Yapılan bir çalışmada bir ön muamele olarak sülfürik asidin kullanılması ile öncelikle demirin uzaklaştırıldığı kalan bakiyenin ise 1000°C'nin altında kalsine edildikten sonra alüminyumun klorürü formunda geri kazanıldığı belirtilmektedir [22]. Ayrıca literatürde kırmızı çamurun altın kazanımında pH modifiyeri olarak kullanıldığı [23] ve değerli metallerin biyo liç ile geri kazanıldığı çalışmalara da rastlanmaktadır [20, 24]. Bu çalışmada, kırmızı çamurdaki çeşitli metallerin çözünürlük davranışı mekanik olarak aktive edilmiş örneklerin HCl varlığında liç edilmesi ile incelendi.

## 2. Materyal ve Metot

Kırmızı çamur Seydişehir Alüminyum tesisinden temin edilmiştir. Kırmızı çamur halkalı bir öğütücü kullanılarak topaklanmaların dağılması ve belirli bir başlangıç tane boyutuna getirilmesi sağlanmıştır. Eleme işleminden sonra -200 mesh tane boyutuna sahip kırmızı çamur deneylerde kullanılmak üzere kapaklı plastik kaplarda muhafaza edilmiştir. Diğer taraftan söz konusu atığın kimyasal bileşimi mikrodalgada çözünürlüştürülmesini takiben elde edilen çözeltilerin ICP ile analiz edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kırmızı çamurun kimyasal bileşimi Tablo 1'de görülmektedir.

**Tablo 1.** Kırmızı çamurun kimyasal bileşimi

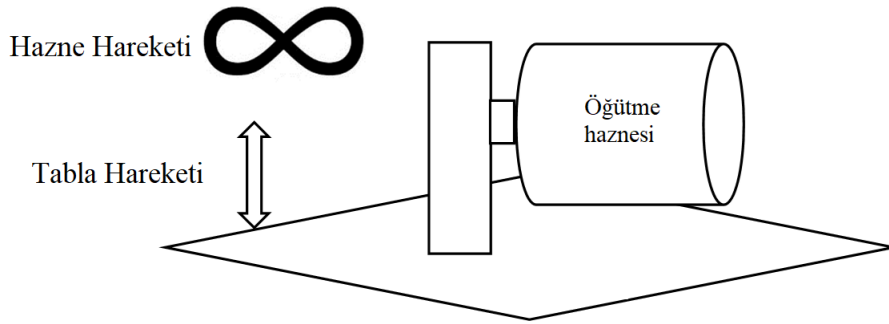
Kimyasal Bileşim (%)										
Fe	Ti	Al	Na	K	Ca	Mg	Pb	Zn	Cr	S
23,05	2,31	9,35	7,43	0,34	0,97	0,16	0,02	0,01	0,07	0,09

Mekanik aktivasyon işlemi yüksek enerji aktarımlı ve masa üstü tip bilyeli bir değirmende yapılmıştır. Öğütme haznesi öğütülen malzemeye kontaminasyonu düşürmek için tungstenden imal edilmiş olup 80 mL hacindedir. Mekanik aktivasyon işlemlerinin tamamı 1/10 kırmızı çamur/bilye oranında gerçekleştirilmiştir.

Mekanik olarak aktive edilecek malzeme söz konusu hazneye farklı büyüklükte bilyeler ile beslendikten sonra hareketli bir tablaya yerleştirilen öğütme haznesinin hareket ettirilmesi ile öğütme işlemi yapılmıştır (Şekil 1).

Liç deneyleri, 15 adet erleni eşit hızda karıştırmaya imkân tanıyan ve karıştırma hızı ayarlanabilen çoklu manyetik karıştırıcı ve bu karıştırıcı üzerine yerleştirilmiş su giriş-çıkışının yapılabildiği ince camdan imal edilmiş bir küvet düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, orijinal kırmızı çamur ve mekanik aktivasyona tabi tutulmuş kırmızı çamur örneklerinin liç edilmesi ile çözeltilere geçen metaller karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Liç deneyleri sonunda elde edilen karışım mavi bant süzgeç kâğıdından süzildükten sonra elde edilen çözeltilerde demir ve alüminyum AAS (Atomik Absorbsiyon Spektrometre-Perkin Elmer A400)' de, titanyum ise UV-spektrometre (Shimadzu UV-VIS mini 1240) kullanılarak analiz edilmiştir. Titanyum analizi, fosforik asit ve hidrojen peroksit varlığında ve iki basamakta gerçekleştirilen bir kompleks oluşumu ile 410 nm dalga boyunda yapılmıştır. Liç deneyleri 0-30 dk öğütme süresinde elde edilen örneklerin 0.1-3.0 M HCl konsantrasyon aralığında, 25 ve 45 °C liç sıcaklığında ve 15-120 dk liç süresi aralığında gerçekleştirilmiştir.

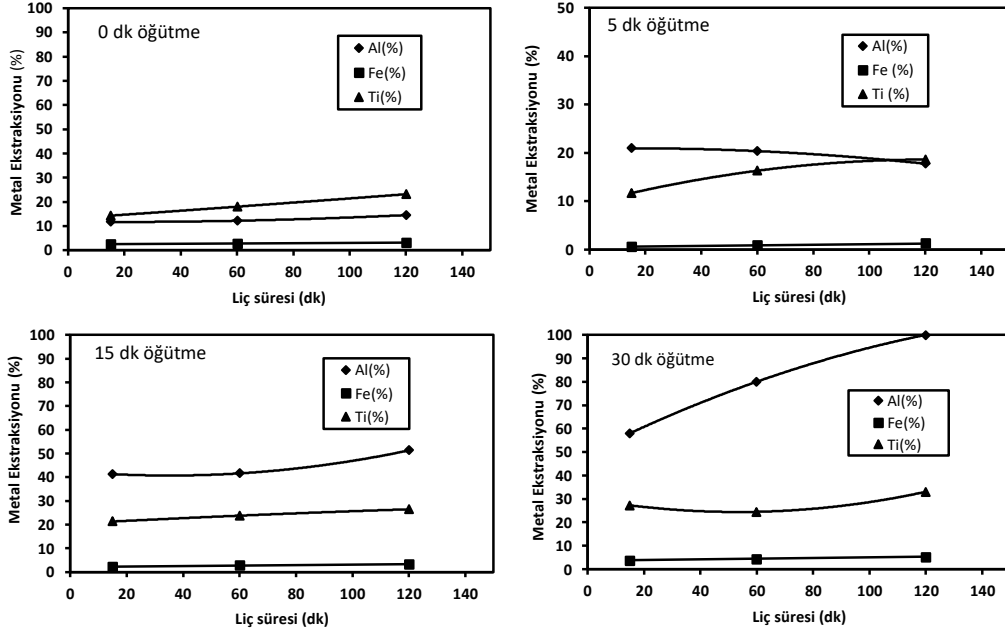


Şekil 1. Masa üstü yüksek enerjili öğütme sistemi

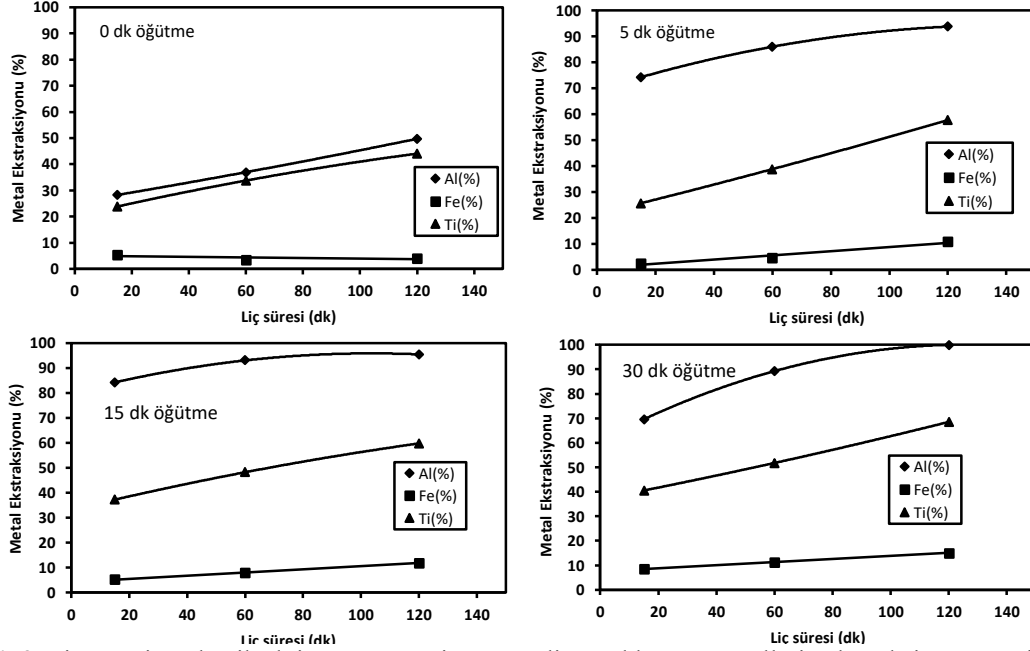
### 3. Sonuçlar

Bu çalışmada, kırmızı çamurda bulunan bazı metallerin çözünürlüğü HCl liçi ile mekanik aktivasyona tabi tutulmuş ve tutulmamış örnekler kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Liç süresi ve öğütme süresinin metallerin ekstraksiyonu üzerindeki etkisi Şekil 2'de görülmektedir. Şekilde artan öğütme süresi ve liç süresiyle birlikte alüminyum ve titanyum ekstraksiyon veriminin arttığı ancak kırmızı çamurda bulunan demir çözünürlüğünün ise oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Deneylerde ayrıca artan liç süresi ile birlikte 5 dk öğütme süresinde titanyum ekstraksiyonu üzerinde daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Buna göre 30 dk mekanik aktivasyona tabi tutulmuş kırmızı çamur örneklerinin 120 dk liç edilmesi sonucu alüminyumun neredeyse tamamının çözeltilere geçtiği, titanyumun yaklaşık % 35 ve demirin ise yaklaşık % 5'nin çözüldüğü belirlenmiştir.



Şekil 2. Liç süresi ve mekanik aktivasyon süresinin metallerin ekstraksiyonu üzerine etkisi (Karıştırma hızı: 400 dev/dk, liç sıcaklığı: 25°C, HCl konsantrasyonu: 3M, sıvı-katı oranı: 25 mL/g).



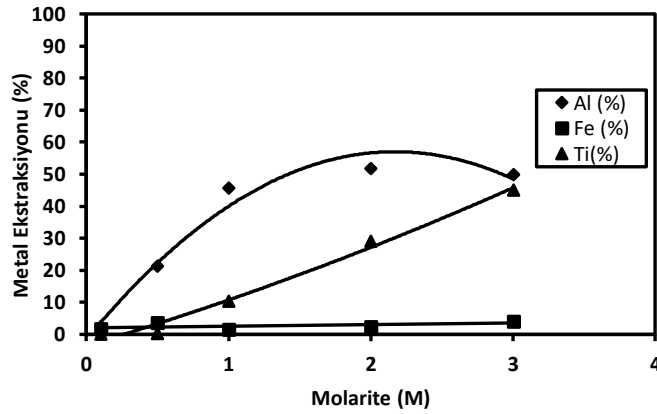
Şekil 3. Liç süresi, mekanik aktivasyon süresi ve artan liç sıcaklığının metallerin ekstraksiyonu üzerine etkisi (Karıştırma hızı: 400 dev/dk, liç sıcaklığı: 45°C, HCl konsantrasyonu: 3M, sıvı-katı oranı: 25 mL/g)

Şekil 3'de deneylerin benzer şartlarda ancak 45°C liç sıcaklığında elde edilmiş sonuçları görülmektedir. Şekilde, artan liç sıcaklığı ile birlikte özellikle mekanik olarak aktive edilmiş örneklerde bütün metallerin

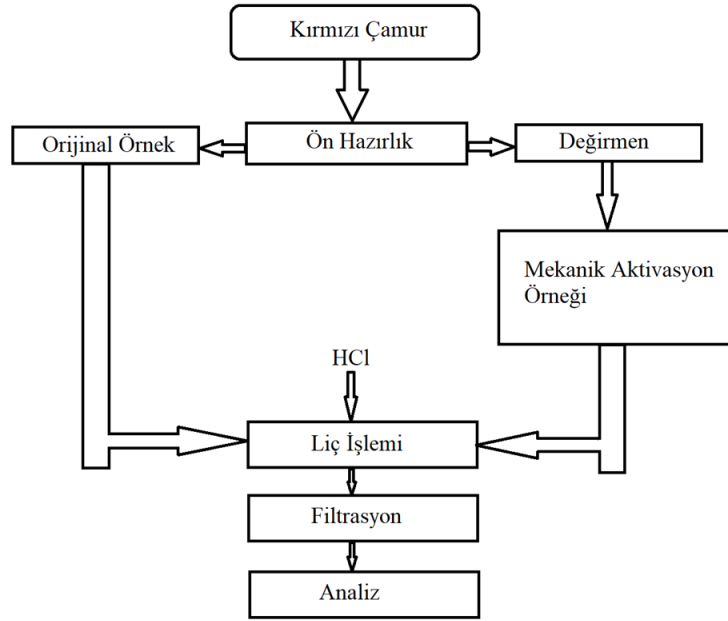
ekstraksiyon veriminde artış olduğu görülmektedir. Buna göre alüminyumun tamamı çözeltiliye geçerken demir ve titanyum çözünürlüğü sırasıyla % 16 ve % 69 olarak belirlenmiştir. Liç sıcaklığı hidrometalurji çalışmalarında metal çözünürlüğünü olumlu etkileyen etkin parametrelerden biridir. Ancak artan liç sıcaklığı ile birlikte çoğu zaman istenmeyen metallere çözeltiliye geçmesi söz konusu olduğundan seçimli ekstraksiyonu olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada da benzer bir eğilimin olduğu, liç çözeltileri için kirletici olarak bilinen ve istenmeyen demir iyonlarının artan liç sıcaklığı ile birlikte arttığı anlaşılmaktadır. Diğer bir önemli sonuç ise mekanik aktivasyon ile elde edilen örnekler üzerinde yapılan deneylerde elde edilen metal ekstraksiyon verimleri orijinal örneklerden elde edilenlerden daha yüksek olmasıdır. Görüldüğü üzere artan liç sıcaklığının özellikle mekanik aktive edilmiş örnekler üzerinde daha etkin olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun muhtemel sebebi, mekanik aktivasyon sonucu kırmızı çamurun spesifik yüzey alanda bir artış olması ve artan yüzey alanı ile birlikte liç reaktantının partikül yüzeyinde reaksiyon verme olasılığının artmasındandır. Mekanik aktivasyonun partikül üzerinde en önemli etkisinin öncelikle azalan partikül boyutuna bağlı olarak yüzey alanında meydana gelen artışlar ve uygun şartlarda kristal yapısının bozulmasıdır [25]. Kırmızı çamurun mekanik olarak aktivasyonu ile elde edilen liç verimlerinde görülen belirgin artışın nedeni bahsedilen bu etkenlerin rol alması ile açıklanabilir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların benzer yayınlar ile karşılaştırmasında özellikle çözeltiliye geçen demir açısından oldukça avantajlı olduğu söylenebilir. Zira, kırmızı çamur ile yapılan diğer çalışmalarda yüksek metal ekstraksiyonu elde etmek için yüksek liç sıcaklıklarında deneyler yapıldığı ve sonuçların bu şartlarda optimize edildiği belirtilmektedir. Ancak yüksek liç sıcaklığı ile birlikte çözeltiliye % 90'dan fazla demirin geçtiği vurgulanmaktadır [7]. Bu çalışmada ise düşük liç sıcaklığında (25 ve 45 °C) yapılan çalışmalarda özellikle mekanik aktivasyonun olumlu sonuçlarının olduğu ve düşük Fe çözünürlüğüne karşın yüksek Al ve Ti verimleri elde edildiği görülmektedir. HCl konsantrasyonunu etkisini incelemek üzere orijinal örneklerde en yüksek 3 M olmak üzere farklı HCl konsantrasyonlarında liç deneyleri gerçekleştirildi (Şekil 4). Şekilde görüleceği üzere artan HCl konsantrasyonu ile birlikte Al ve Ti ekstraksiyonunda önemli artışlar olduğu görülmektedir. Artan asit konsantrasyonunun özellikle titanyumun çözünürlüğü üzerinde etkisinin fazla olduğu ancak çözeltiliye geçen demir üzerinde etkin olmadığı söylenebilir.

Son olarak yapılan deneysel çalışmanın bir akım şeması Şekil 5'de görülmektedir.



**Şekil 4.** HCl konsantrasyonunun metallerin ekstraksiyonu üzerine etkisi (Karıştırma hızı: 400 dev/dk, liç sıcaklığı: 45°C, sıvı-katı oranı: 25 mL/g, liç süresi: 120 dk, öğütme süresi: 0 dk).



Şekil 5. Deneysel çalışma akım şeması.

#### 4. Tartışma

Kırmızı çamurdan metallerin ekstraksiyonu karşılaştırmalı olarak orijinal örnekler ve mekanik aktivasyona tabi tutulmuş örneklerin hidroklorik asit ile liç edilmesiyle incelenmiştir. Mekanik aktivasyon işlemi 1/10 katı-bilye oranında masa üstü tip yüksek enerji aktarımlı bilyeli bir değirmende farklı öğütme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Orijinal örnekler ve mekanik olarak aktive edilmiş örneklerin liç edilmesi ve artan liç sıcaklığı ile birlikte özellikle mekanik aktivasyona tabi tutulmuş örneklerin metal ekstraksiyon verimlerinde önemli artışların olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan, elde edilen sonuçlara göre liç süresinin artmasına da bağlı olarak liç sıcaklığının artması metal ekstraksiyonu üzerinde etkin olduğu söylenebilir. Ayrıca düşük sıcaklıkta yürütülen çalışmalarda da (25 °C'de 30 dk öğütme süresi) reaksiyonların hızlı yürüdüğü (15 dk da yaklaşık % 60 Al ekstraksiyonu) anlaşılmaktadır.

Ayrıca artan hidroklorik asit konsantrasyonunun alüminyum ve titanyum ekstraksiyonu üzerinde olumlu etkisinin olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 30 dk mekanik aktivasyon süresi, 120 dk liç süresi, 400 dev/dk karıştırma hızı, 45°C liç sıcaklığı, 3 M HCl konsantrasyonu ve 25 mL/g sıvı-katı oranında Al, Ti ve Fe ekstraksiyon verimleri sırasıyla % 100, % 68.51 ve % 15.08 olarak belirlenmiştir.

Kırmızı çamur, bünyesinde bulundurduğu metaller ve nadir toprak elementleri açısından gelecekte önemli bir ikincil kaynak olacaktır. Çalışmalarda araştırmacıların çoklu metal ekstraksiyonu üzerinde yoğunlaşması, termal ve mekanik aktivasyonun karşılaştırmalı olarak incelenmesi, elde edilen çözeltilerden nadir toprak elementlerinin solvent ekstraksiyonu ile geri kazanılması önerilir.

#### Teşekkür

Deneysel çalışmaların yapılmasında emeği geçen Nuray Köse, Havva Ak ve Aslıhan Cam'a teşekkür ederim.

#### Kaynaklar

- [1] Uzun D. Kırmızı Çamurdan Demir Ve Alüminyumun Sülfürik Asit Çözeltisindeki Çözünme Kinetiği. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006.
- [2] Gülfen M. Hidroklorik Asit Çözeltisinde Milas Boksit Cevherlerinin Çözünürlüğü. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 1998.

- [3] Özgün MA. Kırmızı Çamur Üretimi Ve Değerlendirme Olanakları. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye, 2012.
- [4] Baláz P, Achimovičová M, Baláz M, Billik P, Cherkezova-Zheleva Z, Criado JM, Delogu F, Dutkova E, Gaffet E, Gotor FJ, Kumar R, Mitov I, Rojac T, Senna M, Streletskii A, Wieczorek-Ciurowa K. Hallmarks of mechanochemistry: from nanoparticles to technology. *Chem Soc Rev* 2013; 42: 7571–7637.
- [5] Baláz P. Extractive Metallurgy of Activated Minerals. 1st edn. Elsevier Science B.V., Amsterdam 2000. ISBN: 0 444 50206 8. Sayfa: 9-124.
- [6] Haug TA. Dissolution and carbonation of mechanically activated olivine- Investigating CO2 sequestration possibilities, Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Norwegian University of Science and Technology, ISBN 978-82-471-1960-0 (printed ver.), Sayfa: 25-26, Norveç, 2010.
- [7] Aksu S. Kırmızı Çamurun Temel Bileşenlerinin Hidrojen Klorür Çözeltisindeki Çözünürlükleri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Kimya Anabilim Dalı, Sakarya, Türkiye, 2001.
- [8] Selcen T, Kalsen A. Kırmızı Çamurdaki Değerli Metallerin Hidrometalurjik Proseslerle Kazanılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [9] Goral MS. Kırmızı Çamurdan Alümina'nın Geri Kazanımında Verimlilik Koşullarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 1999.
- [10] Mishra B, Staley A, Kirkpatrick D. Recovery of value-added products from red mud, *Min Mett Proc* 2002; 19 (2): 87-94.
- [11] Liu W, Yang J, Xiao B. Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues. *J Hazard Mater* 2009; 161 (1): 474–478.
- [12] Smirnov DI, Molchanova TV. The investigation of sulphuric acid sorption recovery of scandium and uranium from the red mud of alumina production. *Hydrometallurgy* 1997; 45 (3): 249–259.
- [13] Yu Z, Shi Z, Chen Y, Niu Y, Wang Y, Wan P. Red-mud treatment using oxalic acid by UV irradiation assistance. *Trans Nonferrous Metal Soc* 2012; 22 (2): 456–460.
- [14] Zhang R, Zheng S, Ma S, Zhang Y. Recovery of alumina and alkali in Bayer red mud by the formation of andradite-grossular hydrogarnet in hydrothermal process. *J Hazard Mater* 2011; 189 (3): 827–835.
- [15] Zhong L, Zhang Y, Zhang Y. Extraction of alumina and sodium oxide from red mud by a mild hydro-chemical process. *J Hazard Mater* 2009; 172 (2–3): 1629–1634.
- [16] Zimmer E, Nafissi A, Winkhaus G. Eclamation treatment of redmud. US patent US4119698, 1978.
- [17] Şayan E, Bayramoğlu M. Atık Kırmızı Çamurdan TiO<sub>2</sub>'nin Seçimli Liçinin Modellenmesi. II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi MBGAK, İstanbul 17–19, 2005.
- [18] Ablamoff B, Qian-de C. Physical and Chemical Principles of Comprehensive Treatment of Aluminum-containing Raw Materials by Basic Process. Central South University of Technology Press 1988; 178–182.
- [19] Liu Z, Yang C, Cheng Z, Ai M. Treatment and utilization of red mud derived from Bayer process. *Chin J Nonferrous Metal* 1997; 7 (1): 40–44.
- [20] Vachon P, Tyagi RD, Auclair JC, Wilkinson KJ. Chemical and biological leaching of aluminum from red mud. *Environ Sci Technol* 1994; 28 (1): 26–30.
- [21] Bosecker K. Bacterial metal recovery and detoxification of industrial waste. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*, Wiley, 1986.
- [22] Uzhidy A, Borlai O, Szabo P, Jelinko R, Szepvolgyi J, Fenyi G, Szabo M. Processing low-quality alumina-containing ores by selective chlorination of iron. *Hungarian Patent* 181729, 1983.
- [23] Browner RE. The use of bauxite waste mud in the treatment of gold ores. *Hydrometallurgy* 1995; 37: 339-348.
- [24] Yang Q, Bin L, Binbin M, Congqiang L. Bioleaching of heavy metals from red mud using *Aspergillus niger*. *Hydrometallurgy* 2013; 136: 71-77.
- [25] Turan MD, Altundoğan HS, Boyrazlı M, Sarı ZA, Nizamoğlu H, Demiraslan A. Basic Leaching Behavior of Mechanically Activated Zinc Plant Residue, *Trans Indian Ins Met* 2019; 72 (9): 2359–2364.





## Kuantum Uyarlamalı Genetik Algoritmalar için Çözüm Kalitesini Artıracak Yeni Bir Yaklaşım

Hasan YETİŞ<sup>1\*</sup>, Mehmet KARAKÖSE<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>\*1</sup> h.yetis@firat.edu.tr, <sup>2</sup> mkarakose@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 08/06/2020;

Kabul/Accepted: 04/10/2020)

**Öz:** Günümüzde kullanımları oldukça kısıtlı olan kuantum bilgisayarlar, sahip oldukları hesaplama gücü potansiyelleri sebebiyle birçok araştırma alanı için heyecan verici olarak karşılanmaktadır. Kuantum bilgisayarların yanında, süper pozisyon ve dolanıklık gibi kuantum hesaplamada kullanılan terimler de klasik algoritmalara uyarlanarak mevcut yöntemlerin kuantum uyarlamaları geliştirilmektedir. Bu çalışmada kuantum uyarlamalı genetik algoritmalar ile elde edilen çözümün kalitesini artırmak adına yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, kuantum popülasyonun gözlemlenmesi ve çözüm adayının elde edilmesi işlemini, önceki çözümlerin uygunluğunu da hesaba katarak gerçekleştirmektedir. Önerilen yaklaşım ile gözlem işlemi sonucunda daha iyi çözümün elde edilme olasılığının artırılması amaçlanmaktadır. Önerilen yaklaşımın, yakınsama hızında artışa yol açtığı ve çözüm kalitesinde yaklaşık 12% civarında bir iyileşme sağladığı deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma, mevcut optimizasyon yöntemini daha verimli hale getirmesinin yanında, bu algoritmaların tamamen kuantum bilgisayarlarda çalışabilecek versiyonlarının geliştirilmesi aşaması için de büyük önem arz etmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Kuantum uyarlamalı genetik algoritma, Kuantum hesaplama, Optimizasyon.

### A New Approach to Improve Solution Quality for Quantum-inspired Genetic Algorithms

**Abstract:** Quantum computers, which are very limited to use today, are welcomed with excitement for many research fields due to their computing power potential. In addition to quantum computers, quantum computing terms based on different bases are also effective in the development of classical algorithms. In this study, a new approach is proposed to improve the quality of the solution obtained by quantum-inspired genetic algorithms. The proposed approach performs the process of observing the quantum population and obtaining a candidate for solution, taking into account the suitability of previous solutions. With the proposed approach, it is aimed to increase the probability of obtaining a better solution as a result of the improved observation process. It is demonstrated by experimental studies that the proposed approach increases the convergence rate and improves solution quality by about 12%. In addition to making the current optimization method more efficient, the work carried out is also of great importance for the development of versions of these algorithms that can run on completely quantum computers.

**Key words:** Quantum-inspired genetic algorithm, Quantum computing, Optimization.

### 1. Giriş

Bilgisayar üzerine teorik çalışmalar daha önceden başlamış olsa da gerçek anlamda ilk fiziksel bilgisayar 20. yüzyılın ortalarında geliştirilmiştir [1,2]. Teorik olarak Boole Cebirine dayanan bu bilgisayarların fiziksel olarak ortaya çıkmasında manyetizma ve elektronik konularındaki bilimsel gelişmeler etkili olmuştur [3]. İkinci dünya savaşı sırasında şifre çözmek için kullanılmaya başlanan ilk genel amaçlı bilgisayar örnekleri çok maliyetli ve işlem güçleri günümüz bilgisayarları ile kıyaslandığında oldukça düşüktü [4,5]. Bilgisayarların maliyetinin düşmesi ve kişisel bilgisayarların ortaya çıkması ise 20. yüzyılın son çeyreğinde gerçekleşmiştir [6].

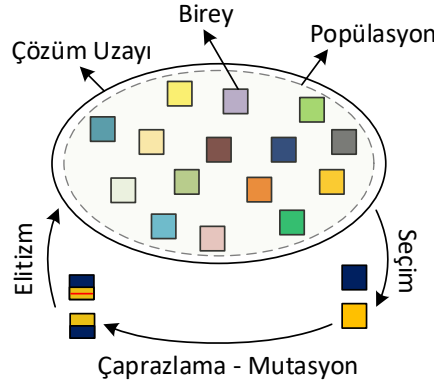
Gelişen teknoloji ile günümüzde insanoğlu kuantum fiziği ve atom altı parçacıklar üzerinde daha bilgili hale gelmiştir [7]. Teorisi 1982 yılından beri var olan ve fiziksel olarak çoğunlukla elektron hareketlerini gözlemlenmesi ile gerçekleştirilen kuantum bilgisayarlar, henüz laboratuvar ortamında çalışsa da yeni nesil kişisel bilgisayarlar için umut vaat etmektedir [8-10]. Günümüzde yaygın olarak uygulanan kuantum bilgisayarların temeli atom altı parçacıkların birbiri ile etkileşiminin incelenmesine dayanmaktadır. Saat çevrimi gerektiren klasik bilgisayarların aksine, bu avantajı sayesinde günümüz laboratuvar ortamında geliştirilen kuantum bilgisayarların, süper bir bilgisayardan 3600 kat daha hızlı çalıştığı belirtilmektedir [11]. Dolayısı ile kuantum bilgisayarlar NP-

\* Sorumlu yazar: [h.yetis@firat.edu.tr](mailto:h.yetis@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0001-7608-3293, <sup>2</sup>0000-0002-3276-3788

hard problemlerin çözümü ve yüksek hesaplama gerektiren makine öğrenmesi yöntemleri için önemli bir potansiyel arz etmektedir.

Günümüzde ancak laboratuvar ortamında stabil çalışabilen kuantum bilgisayarlara bulut servisler ile erişim sağlanması üzerine çalışmalar yürütülmektedir [12]. Ancak kişisel bilgisayarlarda uygulanana kadar kuantum bilgisayarların sahip olduğu potansiyeli tam anlamıyla kullanmış sayılmayacağız. Bu sebeple kuantum hesaplamaların avantajlarını klasik bilgisayarlarda kullanabilmek adına kuantumdan uyarlanan algoritmalar geliştirilmiştir. Kuantumdan uyarlanan algoritmalar temel olarak klasik algoritmalar olmakla birlikte kübit kullanımı gibi bazı kuantum kavramlarının bu algoritmalara entegre edilmesi ile ortaya çıkmıştır. Kuantumdan uyarlanan algoritmalara örnek olarak; Kuantum uyarlamalı Evrimsel Algoritma (KEA), Kuantum uyarlamalı Genetik Algoritma (KGA), Kuantum uyarlamalı Diferansiyel Gelişim Algoritması (KDGA), Kuantum uyarlamalı Parçacık Sürü Optimizasyonu (KPSO) verilebilir [13].

Popüler bir optimizasyon yöntemi olan genetik algoritma (GA), günümüze kadar bir çok problemin çözümünde kullanılmıştır [14-15]. Evrimsel süreci örnek alan GA, birey adı verilen çözüm adaylarından oluşmaktadır. Bu çözümlerin uygunluk değerlerini hesaplayacak bir fonksiyon bulunur. GA iteratif bir yöntem olup, her adımda çözüm uzayından bireyler seçilerek, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik algoritmaya ait işlemler bu bireylere uygulanır. Sonuçta yeni birey elde edilir ve daha iyi uygunluk değerine sahip olan bireyler bir sonraki popülasyona katılırken, düşük uygunluk değerine sahip olan bireyler yok olur. GA'nın çalışması şekil 1 ile gösterilmiştir [16].



Şekil 1. Genetik algoritma yönteminin görselleştirilmesi [16].

GA'nın kuantum uyarlaması çeşitli şekillerle gerçekleştirilebilir. Bireylerin bit yerine kübitlerden oluştuğu ve çaprazlama-mutasyon işlemlerinin klasik şekilde gerçekleştiği, çaprazlama ve mutasyonun olmayıp kuantum kapılar ile iyileştirme sürecinin gerçekleştirildiği, algoritmaların aynı anda birden fazla çalıştırılarak dolanıklık kavramı ile birbiri ile ilişkide olması gibi farklı uygulamaları mevcuttur [17]. Farklı uygulamalara sahip olsa da, ortak olarak hepsinde çözüm elde etmek için bitler yerine kübitler kullanılmaktadır ve bu da gözlem işlemini gerektirir. Bu çalışmada kapı tabanlı KGA'da, gözlem işlemine bir önceki ve iki önceki çözümün uygunluğu göz önünde bulundurularak yeni bir yaklaşımda bulunulmuştur. Çalışmanın devamı yöntemin temelini oluşturan kuantum hesaplama hakkında teorik bilgi, önerilen yöntem, deneysel sonuçlar ve sonuçlardan oluşmaktadır.

## 2. Kuantum Hesaplama

Kuantum hesaplama kavramından önce kuantum kavramının bilinmesi gerekmektedir. Kuantum temel olarak bir atom altı parçacığın durumunun gözlemlenene kadar 0 veya 1 olduğunun belli olmamasına dayanmaktadır. Bu durum kuantum fiziğinde süper pozisyon olarak isimlendirilir ve gözlemlenene kadar bir atom altı parçacığın durumu hem 0 hem 1 olarak kabul edilir. Bu temele dayanarak kuantum bilgisayarlar bit yerine kübit kullanırlar ve bir kübit dönüş (*spin*) yönüne bağlı olarak 0 ile 1 arasında sonsuz değer alabilir. Bir kübitin temsili Bloch küresi veya sadeleştirilmiş hali olan Bloch daresi ile gösterilebilir [18]. Kuantum fiziği ile ilgili bir başka kavram ise dolanıklık kavramıdır. Dolanıklık kavramı iki benzer parçacığın eşzamanlılığa sahip olması anlamına gelmektedir. Yani aralarındaki mesafe ne olursa olsun birbirinden etkilenen parçacıkların olduğunu ifade etmektedir [19]. Bu daha çok adyabetik (*adiabatic*) kuantum bilgisayarlarda karşımıza çıkan bir kavramdır [20].

Kuantum bilgisayarlar, sahip oldukları işlem gücü açısından polinomsal zamanda çözümü mümkün olmayan problemler için büyük bir potansiyel arz etmektedir [21]. Günümüzde IBM Q ve D-Wave Systems gibi büyük firmaların öncülüğünde atom altı parçacıkların dönüş yönlerinin manipüle edilmesi ile kuantum bilgisayarların ilk örnekleri geliştirilmektedir [22,23]. Şu an ihtiyaç duydukları ortam koşulları sebebi ile izole laboratuvar ortamında

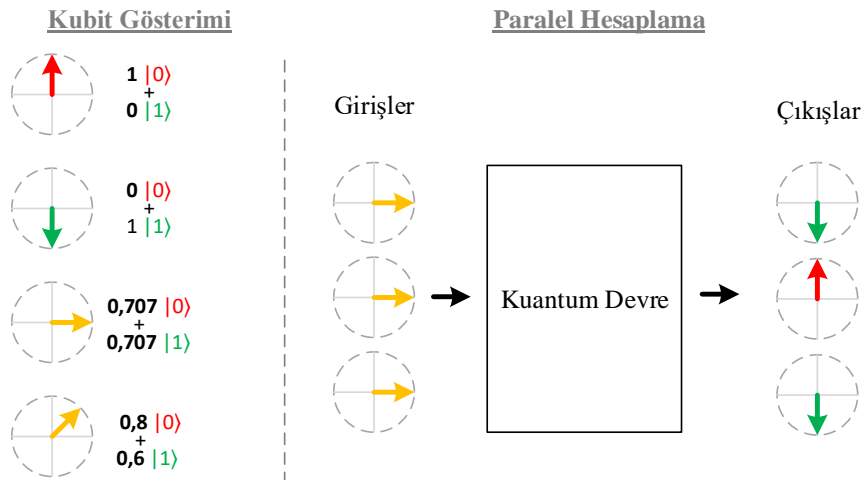
çalışabilen kuantum bilgisayar prototiplerinin, teknolojinin gelişmesi ile normal bilgisayarların yerini alacağı öngörülmektedir. Klasik bilgisayarlarda 0 ve 1'ler bitler ile temsil edilirken, kuantum bilgisayarlarda aynı anda belirli bir olasılıkla hem 0 hem 1 olan kübitler kullanılmaktadır [24]. Kuantum fiziğine göre bir kübitin gözlemlenene kadar durumu belli olmamakla birlikte işlem sonunda gözlemlendiğinde ya 0 ya da 1 olmak durumundadır. Kuantum hesaplamının temelleri bu kurama dayanmaktadır. Gözlemlenene kadar değerinin belli olması, bir kuantum algoritmanın çalışması sonucu üretilen sonuçların farklılaşmasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı kuantum algoritmalar birçok kez çalıştırılarak elde edilen sonuçlar nerede yoğunlaşıyorsa o sonuç çözüm olarak alınmalıdır. Bu durum görünüşte süre açısından dezavantaj gibi gözükse de, kuantum hesaplamının atom altı parçacıklar üzerinde çok daha pratik bir şekilde uygulanması nedeniyle kuantum hesaplama çok daha hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Günümüzde 50 kübitlik bir kuantum bilgisayarın bir süper bilgisayardan yaklaşık 3600 kat daha hızlı çalıştığı raporlanmaktadır [11].

Kuantum hesaplama fiziksel olarak farklı yöntemlerle uygulanabilse de günlük kullanımı açısından en umut vadeden tipi atom altı parçacıkların gözlemlenmesine dayanır [25]. Atom altı parçacıkların dönüş yönlerinin insan müdahalesi ile kontrollü bir şekilde değiştirilmesi sonucu çeşitli hesaplamalar yapılabilmektedir. Kuantum hesaplama ve kuantum işlemciler bu temele dayanmaktadır. Kuantum fiziğinin temelinde bir parçacığın gözlemlenene kadar durumunun belli olmaması vardır. Dolayısı ile bir olasılık söz konusudur. Kuantum hesaplamada yararlanılan en küçük birimler kübit olarak adlandırılır ve klasik Boolean mantığı aksine 0 ile 1 arasında süper pozisyon olarak adlandırılan değere sahiptir. Bu durum matematiksel olarak Denklem 1'de verilen bra-ket notasyonu ile ifade edilmektedir [26].  $a_n$  n. durumunun gerçekleşme ihtimalinin karekökünü temsil etmek üzere, kübitlerin bra-ket notasyonuna göre gösterimi Denklem 2'de verildiği gibi olmaktadır. Buradan yola çıkarak gözlemlendiğinde her zaman 0 olacak bir ifadenin ilk indisi 1, diğerinin 0; her zaman 1 olacak bir ifadenin ise ilk indisi 0, diğerinin 1 değerini alması gerekir.

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad a_1^2 + a_2^2 = 1, \quad \rightarrow \quad |0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Süper pozisyon durumunda olan kübitlerin sağlamış oldukları en büyük avantaj ise 0 ile 1 arasında bir değer alıp, gözlemlendiklerinde 0 veya 1 olabilmeleridir. Şekil 2'de kübitlerin Bloch daireleri ile gösterimine karşılık gelen bra-ket değerleri ve kuantum bilgisayarların paralel hesaplama yeteneği gösterilmiştir. Paralel hesaplama, gözlemlendiğinde 0 veya 1 olma olasılıkları eşit olan kübitlerin devreye giriş olarak verilmesi sonucu hem 0 hem 1 için aynı anda işlem yapılmasıyla gerçekleşir. Elde edilen sonuçlar ise olasılıksal sonuçlar olup, sonucun nerde yoğunlaştığını belirlemek için algoritmaların aynı girişler ile birçok kez çalıştırılması gerekmektedir.



Şekil 2. Kübit gösterimi ve paralel kuantum hesaplamasının gerçekleştirilmesi.

Kullanılan yapıtaşları ve genel prensipler farklı olduklarından dolayı, kuantum sistemlerin çalışması için temelde farklı yaklaşımlar gerekmektedir. Kuantum hesaplamada, klasik Boolean hesaplamalarında kullanılan “ve”, “veya” ve “ya da” gibi operatörler yerine Hadamard, Pauli-X, Pauli-Y, Pauli-Z, Phase ve  $\pi/8$  gibi kuantum operatörleri kullanılmaktadır [27]. Donanımsal olarak kuantum kapısı olarak isimlendirilen bu operatörler, kubitler ile işleme girerek kubitlerin durum değiştirmesine neden olmaktadır. Kuantum algoritmaların çalıştırılabilirliği kuantum Turing makineleri veya kuantum devreleri aracılığıyla test edilir [28]. Kuantum Algoritmalar temelde OpenQASM dili ile koda dönüştürülür [29]. Tablo 1’de temel kuantum kapılarına ait matematiksel modeller ve bunlara ait semboller verilmiştir.

**Tablo 1.** Sık kullanılan temel kuantum kapıları

Adı	Sembolü	Denklemi
Hadamard	H	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
Pauli-X	X	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Pauli-Y	Y	$\begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$
Pauli-Z	Z	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Phase	S	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$
$\pi / 8$	T	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{bmatrix}$

Günümüzde kuantum hesaplama yöntemi ile gerçekleştirilen belli başlı algoritmalar bulunmaktadır. Deutsch, Shor, Grover ve Deutsch-Jozsa bunlardan en çok bilinenleridir [30]. Yetersiz kubit sayısı, kubitlerin hafızada doğrudan tutulmaması gibi problemler, kuantum bilgisayar ve algoritmaların önündeki en büyük engellerdendir. Günümüzde IBM-Q ve D-Wave olmak üzere başlıca 2 büyük kuantum işlemci bulunmaktadır. IBM tarafından geliştirilen IBM-Q kuantum devre tabanlı çalışmaktayken, Google, Nasa gibi firmaları arkasına alan D-Wave 2000Q ise Chimera graf topolojisine göre çalışmaktadır [31]. IBM bilgisayarları günümüzde 50 kübite kadar ulaşırken, 128 kubit ile başlayan D-wave, 2017 yılı itibari ile 5000 kübite sahip işlemcileri tanıtmıştır [7].

### 3. Önerilen Yöntem

GA’ların kuantum uygulaması farklı şekillerde gerçekleştirilebilir [17]. Kuantum tabanlı GA’lar temel olarak GA’lardaki bireylerin bit yerine kubitler ile temsiline dayanır. Dolanıklık adı verilen kavramın uygulanması ile bu algoritma paralel olarak işletilebilir ancak bu çalışmanın odağı kubit kullanımı üzerinde olacaktır. Bu çalışmada kuantum kapılar ile gerçekleştirilen KGA temel alınmıştır. Bu yöntemle göre çözümler, kubitler ile temsil edilen kuantum popülasyonunun gözlemlenmesi sonucu elde edilir. Yöntemin çalışmasına ait sözde kod tablo 2 ile verilmiştir.

**Tablo 2.** Kuantum uyarlamalı genetik algoritma sözde kodu [17].

	Sözde Kod
1	Q(0) başlangıç kuantum popülasyonunu oluştur
2	Q(0)’daki verileri gözlemleyerek P(0) ikili çözümünü elde et
3	P(0) uygunluğunu hesapla ve en iyi çözümü tut
4	
5	<b>while</b> (sonlanma kriteri sağlanmadığı sürece) <b>do</b>
6	<b>begin</b>
7	t ← t+1
8	U(a) uygulayarak Q(t)’yi güncelle
9	Q(t)’deki verileri gözlemleyerek P(t) ikili çözümünü elde et
10	P(t) uygunluğunu hesapla ve en iyi çözümü tut
11	<b>end</b>

Uygulamada yararlanılan KGA sahte kodu tablo 2’de verildiği gibidir. Burada kuantum popülasyonlardan anlamlı çözümler elde edebilmek için gözleme (*collapse*) işlemi uygulanmalıdır. Kuantum fiziğinde bir parçacığın gözlemlenene kadar 0 veya 1 olduğu bilinemez. Yani gözlemlenene kadar sonuç sadece olasılıksaldır. Kübitler ifade edilirken değerlerinin kareleri toplamının 1’e eşit olması gerekir. Bir başka deyişle değerlerin kareleri bize gerçekleştirilme olasılığını vermektedir. Dolayısı ile parçacıkların gözlemlenme işlemi bu olasılıklar dâhilinde yapılır. Algoritmadaki ikinci temel dinamik de kuantum popülasyonunun güncellenmesi işlemidir. Popülasyonun güncellenmesi tüm genomların belirli bir açı ile dönmesi ile gerçekleştirilir. a dönme açısı olmak üzere matematiksel hesaplamalar, Denklem 3 ve 4’teki gibi gerçekleştirilerek güncellenmiş  $|\psi'\rangle$  değeri elde edilir.

$$U(a) = \begin{bmatrix} \cos(a) & -\sin(a) \\ \sin(a) & \cos(a) \end{bmatrix} \quad (3)$$

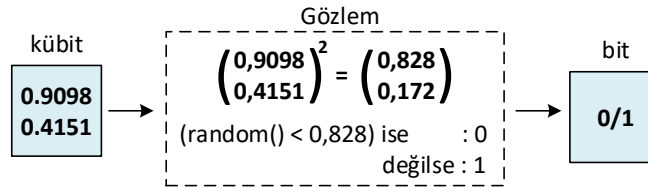
$$|\psi'\rangle = U(a) * |\psi\rangle \quad (4)$$

Dönme açıları en iyi çözümün bit değeri ve o andaki çözümün bit değerine göre belirlenir. İlgili genomun bit değeri ile en iyi çözümde denk gelen genomun bit değerleri aynı ise güncelleme yapılmazken, diğer durumlarda uygunluk değerlerine göre güncelleme işlemi gerçekleştirilir. Burada negatif yönde dönme işlemi 0 olasılığını artırırken, pozitif yöndekilerin 1 olasılığını artırması beklenmektedir. Tablo 3’te kübit güncelleme için seçilecek açı değeri verilmiştir. Burada f uygunluk fonksiyonu olup,  $x_i$  anlık çözümün i. biti,  $b_i$  ise en iyi çözümün i. bitini ifade etmektedir.

**Tablo 3.** Dönme açılarının belirlenmesi [15].

$x_i$	$b_i$	$f(x) > f(b)$	<i>güncelleme açısı</i>
0	1	hayır	a
0	1	evet	-a
1	0	hayır	-a
1	0	evet	a

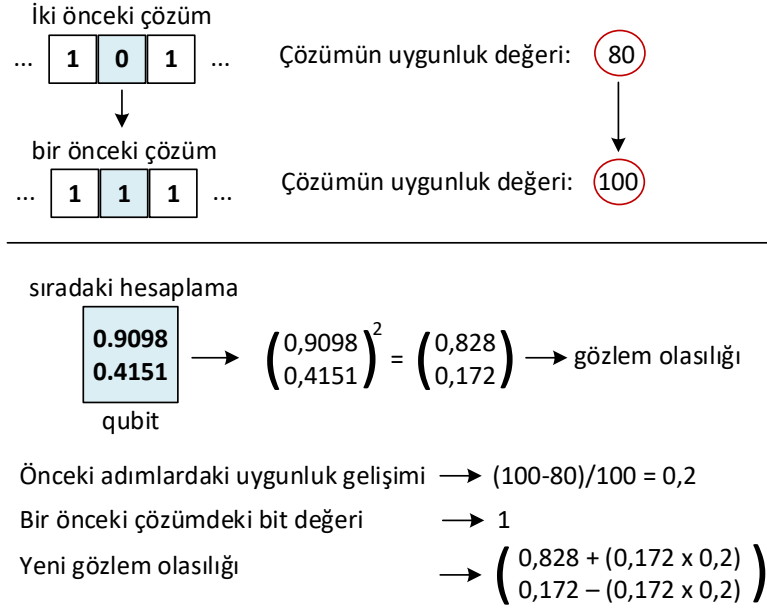
Gözlem işlemi sonucunda, kübit biçimindeyken olasılıksal olarak 0 veya 1 olabilecek ifadelerin net olarak 0 mı 1 mi olduğu belirlenir. İlgili bitin 0 veya 1 olma olasılığı kübitin karesine bağlı olarak gerçekleşir. . Denklem 2’de kübit değerlerinin karelerinin toplamının 1 olacağı ifade edilmiştir. Dolayısı ile bu işlem simülasyon ortamında olasılık hesabına dönüşmektedir. Gözlem işleminin gerçekleştirilmesi şekil 3’te verilmiştir.



**Şekil 3.** Kuantum uyarlamalı genetik algoritma gözlem (*collapse*) işlemi.

Şekil 3’te de görüldüğü üzere kübitlerin gözlem sonucu alacağı bit değerleri her adımda bağımsız olarak gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmada gözlem işleminde bir önceki ve iki önceki adımlardaki uygunluk değerindeki iyileşmenin de hesaba katılması önerilmiştir. Böylelikle iyi sonuç veren gözlemin bir sonraki adımda daha baskın olması hedeflenmektedir.

Önerilen yaklaşımda gözlem işlemi Şekil 4’te verildiği üzere gerçekleştirilmektedir. Klasik KGA’da, anlık çözüm ve en iyi çözüm değerlerine göre kuantum popülasyon üzerinde Denklem 3 ve 4’ten yararlanılarak güncellemeler yapılır. Önerilen yöntemde ise bir önceki ve iki önceki adımlarda elde edilen en iyi ikili çözümler tutulur. Bu ikili çözümlerde mevcut çözümünün uygunluk değeri en iyi çözümden daha iyi ise, bit değerlerindeki değişimin durumu incelenir. Bit değerlerinde değişim söz konusu ise gözlem sonucunun mevcut çözümün bit değerini verme olasılığı artırılır. Bunun için uygunluk değerindeki artış oranı doğrultusunda güncellemeler yapılır. Çözüm uygunluk fonksiyonu sonucu artış oranı hesaplandıktan sonra gözlem olasılığı düşük olan değer ile artış oranını çarpılarak değişim miktarı hesaplanır. Değişim miktarı bir önceki çözümün bit değerinin olasılığını artıracak biçimde olasılıklardan birine eklenirken diğerinden çıkarılır. Yeni kuantum popülasyondaki değerler, yeni gözlem oranının karekökü olacak şekilde popülasyon güncellenir.

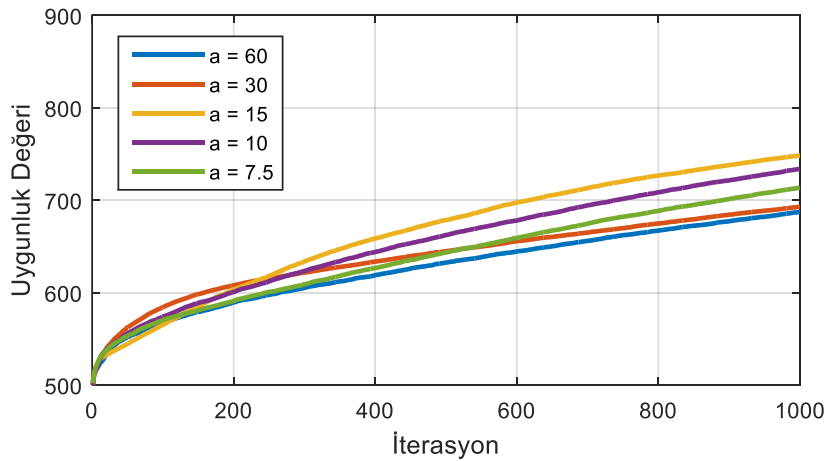


Şekil 4. Önerilen yöntem ile gözlem işleminin gerçekleştirilmesi

#### 4. Deneysel Sonuçlar

Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek üzere GA, KGA ve önerilen yöntem sık kullanılan kıyaslama problemlerinden biri olan Sphere problemi üzerinde uygulanmıştır [32]. Uygulamaların test edilmesinde üzerinde SSD bulunan, 7. nesil i7 işlemcili, 6gb ram kapasitesine sahip Windows 10 işletim sistemi yüklü bir bilgisayar kullanılmış olup, çalışmalar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Sezgisel yöntemlerin çalışmaları kararlı olmadıklarından dolayı her bir yöntem 100 kez çalıştırılmış ve her adımdaki en iyi çözümlerin ortalaması alınarak sonuçlara eklenmiştir. Yöntemlerin yakınsama hızlarının daha net görülebilmesi için erken çıkma kriteri konulmamış ve bütün yöntemler sabit 1000 iterasyon boyunca devam ettirilmiştir.

İlk olarak uygun güncelleme açısının tespit edilmesi için farklı açılarla KGA çalıştırılmıştır. Farklı değişim açılarının yöntem üzerindeki etkisini görmek adına 7.5, 10, 15, 30 ve 60 güncelleme açıları ile yöntem test edilmiştir. Uygunluk değerlerindeki değişim şekil 5 ile verilmiştir.



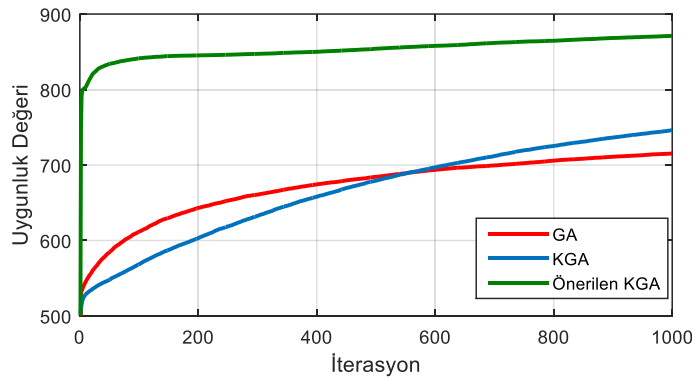
Şekil 5. Farklı güncelleme açıları için KGA performansı.

Şekil 5'teki grafik incelendiğinde  $a=30$  değeri için yöntemin yakınsama hızının ilk 200 iterasyon için diğer parametrelere göre yüksek olduğu görülmektedir. Ancak ilerleyen iterasyonlarda yakınsama hızı düşmekte ve nerdeyse en kötü sonuçlardan birini vermektedir. Bunun tam tersi olarak  $a=15$  değeri ilk 200 iterasyon boyunca diğer eğrilerin gerisinde kalsa da, 1000 iterasyon sonunda en iyi sonucu veren parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun sebebi yüksek açı değişimlerinin, başlangıçta çözüme yaklaşma hızını artırması, ancak ilerleyen adımlarda daha hassas değişimlere imkan vermemesi olarak gösterilebilir. 1000 iterasyonluk performanslar sayısal olarak tablo 4 ile verilmiştir. Tabloda farklı değişim açısına sahip yöntemlerin, farklı çalışma süreleri ile gerçekleşmiş olması dikkat çekmektedir. Bu farklılık, en iyi çözüm ile anlık çözümdeki bitlerin uyumsuzluğu sonucu daha fazla kod parçacığı çalıştırma gereğinden kaynaklanmaktadır.

**Tablo 4.** Farklı değişim açılarının çalışma performansına etkisi

Değişim açısı	En iyi çözüm	Geçen Süre (sn.)
7.5	704	1,49
10	735	1,42
15	<b>751</b>	1,38
30	694	1,26
60	680	1,74

GA, KGA ve önerilen yöntem bilgisayar ortamında çalıştırılarak uygunluk değerlerindeki değişim şekil 6 ile verilmiştir. Grafikte, çaprazlama oranı 0.85 ve mutasyon oranı 0.01 olan, 20 popülasyon büyüklüğüne sahip GA'dan elde edilen sonuçlar verilmiştir. GA'nın çalışması ortalama 4,53 sn sürmüştür. Ardından  $a=15$  dönme açısı parametresine sahip KGA'dan sonuçlar toplanmıştır. KGA'larda kuantum popülasyon ilk başta tüm olasılıklar eşit ve 0.707 olacak şekilde başlatılmıştır. 1000 iterasyon gerçekleşme süresi ortalama 1,39 sn sürmüştür. Şekil 6 incelendiğinde GA'ların başlangıçta yakınsama hızının daha fazla olduğu görülürken, iterasyon sayısının artması ile bu hızın azaldığı görülmektedir. Aksi olarak KGA'da ise ilk baştaki yakınsama hızı ile sondaki hız arasında nispeten daha az fark bulunmaktadır. Toplam 1000 iterasyon sonucunda KGA'nın daha iyi bir çözüme ulaştığı görülmektedir. Son olarak gözlem aşamasında önemli katkılar sunduğumuz KGA tabanlı yöntem uygulanmıştır. Ortalama 1,48 sn çalışma süresine sahip yöntemin, diğer yöntemlerden çok daha başarılı şekilde sonuca ulaştığı görülmektedir. Burada GA'ların çaprazlama ve mutasyon gibi farklı adımlara sahip olmasından ve farklı parametreler ile daha iyi sonuçlar elde etme ihtimali bulunduğundan dolayı değerlendirme için bir kısas oluşturamamaktadır. Ancak aynı şartlarda gerçekleşen orijinal KGA'ya bakıldığında sağlanan katkının büyük oranda getirisi olduğu görülmektedir. Uygunluk değerinin 500'e ulaşması ise her 3 yöntemde de çok erken iterasyonlarda gerçekleşmiştir.



**Şekil 6.** Yöntemlerin performans kıyaslaması

## 5. Sonuçlar

Kuantum bilgisayarların sahip oldukları işlem gücü potansiyeli, özellikle çözümü uzun süre gerektiren yapay zeka yöntemleri için umut kaynağı olmuştur. Sahip oldukları potansiyel, araştırmacıları bu alana doğru itmektedir. Günümüzde kuantum bilgisayarlar emekleme çağını yaşamaktadır. Gerek donanımsal olarak gerek yazılımsal olarak aşılması gereken birçok problem yer almaktadır. Kuantum bilgisayarların bu döneminde, kuantum



uyarlamalı algoritmalar ile hem kuantum hesaplamının sağlamış olduğu bazı avantajlardan yararlanılmakta, hem de mevcut algoritmaların kuantum bilgisayarlara uyarlanabilirliği artırılmaktadır. Kuantum uyarlamalı algoritmalar temel olarak süper pozisyon ve dolanıklık gibi kavramların klasik algoritmalara uyarlanması ile gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmada KGA üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. KGA'da, kuantum popülasyondan normal popülasyon elde etmek için gözlem işlemi yapılmaktadır. Gözlem işlemi ile süper pozisyon durumunda olan çözümler 0 veya 1 durumlarından birine dönüştürülmektedir. Kübit ile ifade edilen olasılıklara göre gerçekleşen bu gözlem işlemi, yapılan çalışma ile önceki çözümlerin başarımındaki artışa bağlanarak iyileştirilmiştir. Yönteme göre gözlemlenecek olan kübit, ilgili kübitin bir önceki ve iki önceki iterasyonda gözlemlenmesi sonucu elde edilen bit değerinden etkilenir. Bit değerindeki değişim uygunluk değerinde artışa sebep oluyorsa, gözlem işlemi artışa sebep olan değer olasılığını artıracak şekilde gerçekleştirilir. Bu sayede yöntemin çözüme yakınsama hızında büyük bir artış elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sunulan katkımın, yöntemin başarımı üzerinde doğrudan olumlu etkiye sahip olduğu görülmektedir. 1000 iterasyon sonunda orijinal yönteme oranla yaklaşık 12% oranında daha iyi sonuç elde edildiği görülmektedir. Ayrıca diğer yöntemlerin daha yavaş çözüme yakınsamasına rağmen, önerilen yöntemin ilk iterasyonlarda büyük ölçüde çözüme yakınsadığı görülmektedir. Gerçekleşme süreleri göz önüne alındığında ise, önerilen yöntemin GA'lardan daha kısa sürede gerçekleştiği görülmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Campbell-Kelly M. Computer, Student Economy Edition: A History of the Information Machine. Routledge, 2018.
- [2] Daylight EG. Towards a historical notion of 'Turing - the father of Computer Science'. Hist. Philos. Logic, 2015; 36(3): 205-228.
- [3] Bo C, Xingyou Z, Pengfei Z, Cong C, Wnxue L, Kang Z. The Boolean Algebra Logic: The Soundness and Completeness Theorem" IEEE 13th International Conference on Semantics, Knowledge and Grids (SKG), 2017.
- [4] O'Regan G. EDVAC and ENIAC Computers. The Innovation in Computing Companion, Springer. 2018: 113-117.
- [5] O'Regan G. The First Digital Computers. Introduction to the History of Computing, Springer. 2016: 55-72.
- [6] Siddiqui N. Byting Out the Public: Personal Computers and the Private Sphere. Dissertations, Theses, and Masters Projects, 2018.
- [7] Singh J, Mohit S. Evolution in quantum computing. IEEE International Conference System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART), 2016.
- [8] Samaroo, McGuigan M. Using IBM-Q to study and visualize the ground state properties of the Su-Schrieffer-Heeger model. IEEE New York Scientific Data Summit (NYSDDS), 2018.
- [9] Nishio S, Takahiko S, Rodney DM. High Fidelity Qubit Mapping for IBM Q. Proc. 2nd International Workshop on Quantum Compilation, 2018.
- [10] Albash T, Rønnow TF, Troyer M, Lidar DA. Reexamining classical and quantum models for the D-Wave One processor. The European Physical Journal Special Topics, 2015; 224(1): 111-129.
- [11] Elsayed N, Anthony SM, Magdy B. A Review of Quantum Computer Energy Efficiency. IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), 2019.
- [12] Castelvechi D. IBM's quantum cloud computer goes commercial. Nature News. 2017; 543(7644): 159.
- [13] Karmakar S, Dey A, Saha I. Use of Quantum-inspired Metaheuristics during Last Two Decades. IEEE 7th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2017.
- [14] Yetiş H, Baygın M, Karaköse M. A New Micro Genetic Algorithm Based Image Stitching Approach for Camera Arrays at Production Lines. Journal of Image and Graphics. 2017; 5(1): 20-24.
- [15] Aydın İ, Karaköse M, Karaköse E. A navigation and reservation based smart parking platform using genetic optimization for smart cities. IEEE 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG), 2017.
- [16] Yetiş H, Karaköse M. Performance Comparison of Population-Based Quantum-Inspired Evolutionary Algorithms. 1st International Informatics and Software Engineering Conference (UBMYK), 2019.
- [17] Rafael LB. Quantum genetic algorithms for computer scientists. Computers. 2016; 5(4): 1-31.
- [18] Mukai T. Completely scrambled memory for quantum superposition. Sci. Rep. 2019; 9(1): 1-5.
- [19] Cleland. Acoustic Phonon Fock States and Phonon-mediated Quantum Entanglement. Bulletin of the American Physical Society, 2020.
- [20] Grant E, Travis H. Adiabatic Quantum Computing. Oxford Research Encyclopedia of Physics, 2019.
- [21] Gyongyosi L, Sandor I. A survey on quantum computing technology. Comput. Sci. Rev. 2019; 31: 51-71.
- [22] Dinneen MJ, Anuradha M, Kai L. Finding the chromatic sums of graphs using a D-Wave quantum computer. The Journal of Supercomputing. 2019; 75(8): 4811-4828.
- [23] Behera BK, Seth S, Das A, Panigrahi PK. Demonstration of entanglement purification and swapping protocol to design quantum repeater in IBM quantum computer. Quantum Inf. Process. 2019; 18(4): 108.
- [24] Wright K, Beck KM, Debnath S, Amini JM, Nam Y, Grzesiak N, Chen JS, Pseni NC vd. Benchmarking an 11-qubit quantum computer. Nat. Commun. 2019; 10(1):1-6.

- [25] Jain V, Yoon T, Lei CU, Chu Y, Frunzio L, Rakich P, Schoelkopf R, Jain V, vd. Listening to Bulk Crystalline Vibrations with Superconducting Qubits. *Bulletin of the American Physical Society*, 2020.
- [26] Chen C, Huamin Y. Characterizing turbulence-induced decay of mutual unbiasedness of complementary bases relevant to propagated photonic spatial-mode states. *IEEE Access*. 2019; 7: 108761-108767.
- [27] Bakkegaard T, Kristensen LB, Loft NJS, Andersen CK, Petrosyan D, Zinner NT. Realization of efficient quantum gates with a superconducting qubit-qutrit circuit. *Sci. Rep.* 2019; 9(1):1-10.
- [28] Bravyi S, Browne D, Calpin P, Campbell E, Gosset D, Howard M. Simulation of quantum circuits by low-rank stabilizer decompositions. *Quantum*. 2019; 3:181.
- [29] Murali P, Javadi-Abhari A, Chong FT, Martonosi M. Formal constraint-based compilation for noisy intermediate-scale quantum systems. *Microprocess. Microsyst.* 2019; 66: 102-112.
- [30] Montanaro. Quantum algorithms: an overview. *npj Quantum Inf.* 2016; 2(1):1-8.
- [31] Vert D, Sirdey R, Louise S. On the limitations of the chimera graph topology in using analog quantum computers. *Proceedings of the 16th ACM international conference on computing frontiers*, 2019.
- [32] Hussain K, Salleh MN, Cheng S, Naseem R. Common Benchmark Functions for Metaheuristic Evaluation: A Review. *International Journal on Informatics Visualization (JOIV)*. 2017; 4(2): 218-223.



## Doğal Asfalt ve SBS Modifiyeli Bitümlü Bağlayıcıların Karşılaştırılması

Yunus ERKUŞ<sup>1\*</sup>, Baha Vural KÖK<sup>2</sup>, Mehmet YILMAZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> yerkus@firat.edu.tr, <sup>2</sup> bvural@firat.edu.tr, <sup>3</sup> mehmetyilmaz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 09/06/2020;

Kabul/Accepted: 08/10/2020)

**Öz:** Bu çalışmada, Irak'ın Zaho bölgesinden çıkarılan doğal asfalt (NA) ile modifiye edilen bitümünün özellikleri araştırılmıştır. NA, saf bitümün ağırlığınca %20, %35 ve %50 oranlarında kullanılmıştır. NA modifiyeli bağlayıcıların özellikleri, %2 ve %4 SBS içeren modifiye bağlayıcılarla karşılaştırılmıştır. Bağlayıcılara penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozimetre ve dinamik kayma reometresi deneyleri uygulanmıştır. Bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetleri ve tekerlek izi dirençleri değerlendirilmiştir. Bitüme NA ilavesi yumuşama noktası, viskozite ve tekerlek izi parametresinde önemli bir artışa neden olmuştur. %50 oranında kullanılan NA işlenebilirlik açısından bir sorun teşkil etmemiştir. %50 NA modifiyeli bağlayıcının tekerlek izi parametresi %4 SBS modifikasyonundan 4.3 kat daha fazla çıkmıştır. Sıcaklık hassasiyeti bakımından NA modifikasyonu kabul edilebilir değerler verse de SBS modifikasyonu kadar başarılı olamamıştır. NA modifiyeli kaplamaların, işlenebilirlik bakımından olumsuz bir sonuç oluşturmadan, yüksek hava sıcaklığına sahip bölgelerde, ağır trafik koşullarına, SBS modifikasyonuna göre daha ekonomik olarak direnç gösterebileceği tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Doğal asfalt, SBS, bitüm, sıcaklık hassasiyeti, modifikasyon.

## Comparison of Bituminous Binders Modified by Natural Asphalt and SBS

**Abstract:** In this study, properties of bitumen modified with natural asphalt (NA) extracted from Zaho region of Iraq were investigated. NA was used in 20%, 35% and 50% of the weight of pure bitumen. The properties of NA modified binders were compared with 2% and 4% SBS modified binders. Penetration, softening point, rotational viscometer and dynamic shear rheometry tests were applied to the binders. The addition of NA to the bitumen resulted in a significant increase in softening point, viscosity and rutting parameter. NA used by 50% was not a problem in terms of workability. The rutting parameter of the 50% NA modified binder is 4.3 times more than the 4% SBS modification. Although the NA modification gave acceptable values in terms of temperature sensitivity, it was not as successful as the SBS modification. It has been determined that NA modified pavements can resist heavy traffic conditions as more economically than SBS modification in regions having high air temperature without any workability problem.

**Key words:** Natural asphalt, SBS, bitumen, temperature sensitivity, modification.

### 1. Giriş

Artan trafik hacimleri ve araç yüklerinden dolayı sıcak karışım asfaltının, kalıcı deformasyonlara ve termal çatlamalara karşı koyabilmesi için özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla bitüm ve bitümlü sıcak karışımlarda sıklıkla polimer tipi katkı maddeleri kullanılmaktadır. Stiren-bütadien-stiren (SBS), saf bitümün ve dolayısıyla bitümlü karışımların özelliklerini arttırmak için en çok kullanılan katkı maddesidir. SBS modifikasyonu maliyet artışına neden olduğundan, katkı olarak doğal ve atık malzemelerin kullanımı önemli bir konu haline gelmiştir. Doğal asfaltlar, hidrokarbonlar ve aromatik moleküller içeren katı yada yarı katı yapı malzemeleridir. Doğal asfaltlar, genel olarak karbon ve hidrojen oluşmasına rağmen nitrojen, hidrojen, sülfürün yanı sıra az miktarda demir, nikel ve vanadyum gibi metaller de içermektedir [1]. Amerika ve İran gibi ülkelerde çıkarılan Gilsonit, Trinidad ve Tobago'da bulunan göl asfaltı, Kanada'da temin edilen katranlı kum, Suriye'de ve Endonezya'da bulunan katranlı kum asfalt karışımlarda çeşitli oranlarda kullanılmış ve asfalt kaplamasının performansını artırdığı tespit edilmiştir.

Doğal asfalt olan Qingchuan kaya asfaltı ve silika katkıları bitümün viskozite değerini önemli ölçüde artırmıştır. Katkılar birlikte kullanıldığında yüksek sıcaklık deformasyon direnci en iyi değerleri vermiştir. Yüksek sıcaklık direnci açısından Qingchuan kaya asfaltı daha iyi sonuçlar göstermiştir. Modifiye bitümün düşük sıcaklık

\* Sorumlu yazar: [yerkus@firat.edu.tr](mailto:yerkus@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7664-2964, <sup>2</sup> 0000-0002-7496-6006, <sup>3</sup> 0000-0001-6700-6579

performansı her iki katkı kullanımında da kötüleşmiştir. Bunun yanında silikanın düşük sıcaklık performansına etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir [2]. Trinidad göl asfaltı (TLA) katkısının kullanımı saf bağlayıcının süneklik değerini ve penetrasyon değerini düşürürken yumuşama noktası değerini artırmıştır. Ayrıca TLA saf bağlayıcı ile mükemmel bir uyum göstererek yüksek sıcaklık stabilitesini ve tekerlek izi dayanımı geliştirmiştir [3]. İran kaya asfaltı, Buton adası kaya asfaltı, Trinidad göl asfaltı ve SBS modifiyeli bitümlerle ve saf bitümle hazırlanan karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanımları değerlendirildiğinde, kalıcı deformasyonlara direnci en fazla olan katkının İran kaya asfaltı olduğu, en az olan katkının ise Trinidad göl asfaltı olduğu belirlenmiştir [4]. En sık kullanılan doğal asfalt katkılarından olan Gilsonit katkı oranı arttıkça bağlayıcıların viskozitesini, yumuşama noktasını ve kompleks kayma modülünü arttırdığı, faz açısı ve penetrasyonunu azalttığı belirlenmiştir [5]. İran'da bulunan 5 farklı türden Gilsonit ile modifiye edilen bağlayıcıların, orta ve yüksek sıcaklık performanslarının önemli derecede iyileştiği belirlenmiştir. Gilsonit oranının artmasıyla bu iyileşmenin devam ettiği gözlenmiştir. Gilsonit, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklık performanslarını geliştirmesine rağmen düşük sıcaklık performansını olumsuz etkilemiş ve modifiye bitümlerdeki Gilsonit içeriğinin artmasıyla düşük sıcaklık performansının kötüleştiği belirlenmiştir [6]. Stiren-butadien-stiren (SBS) ve Amerikan Gilsoniti'nin (AG) bitümlü bağlayıcılarda kullanımı araştırıldığında, aynı performans seviyesine sahip bağlayıcılar elde etmek için %2 SBS ile %13 AG, %3 SBS ile %10 AG ve %4 SBS ile %6 AG kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. SBS ve AG katkı maddelerinin bağlayıcıların kıvamını arttırdığı, penetrasyon değerleri üzerinde en etkin katkı türü ve oranının %18 AG olduğu ve tüm katkı maddelerinin yumuşama noktası ve viskozite değerleri üzerinde benzer etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, ısı hassasiyetinin katkı kullanımı ile azaldığı ve en etkin katkının %5 SBS olduğu saptanmıştır [7]. Saf bağlayıcıda Gilsonit oranının artışıyla tekerlek izi parametresi yükselmiş ancak SBS modifiyeli bitüm ile karşılaştırıldığında düşük kalmıştır. Ayrıca, Gilsonit ve SBS modifiyeli bağlayıcıların viskozitesi her zaman aynı oranda sadece SBS içeren modifiyeli bağlayıcıdan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Gilsonit'in sahadaki asfalt karışımı üretim ve sıkıştırma maliyetini azaltmak için alternatif bir katkı olarak kullanılması önerilmiştir [8].

Bu çalışmada; Irak doğal asfaltının bir katkı olarak kullanımının bitümün sıcaklık hassasiyeti ve reolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bunun yanı sıra sadece SBS kullanılan modifiye bağlayıcılarla kıyaslama yapılmıştır. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, dönel viskozite ve dinamik kesme reometrisi deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca sıcaklık hassasiyetini temsil eden parametreler hesaplanarak geniş ölçekli bir değerlendirme yapılmıştır.

## 2. Malzeme ve Metot

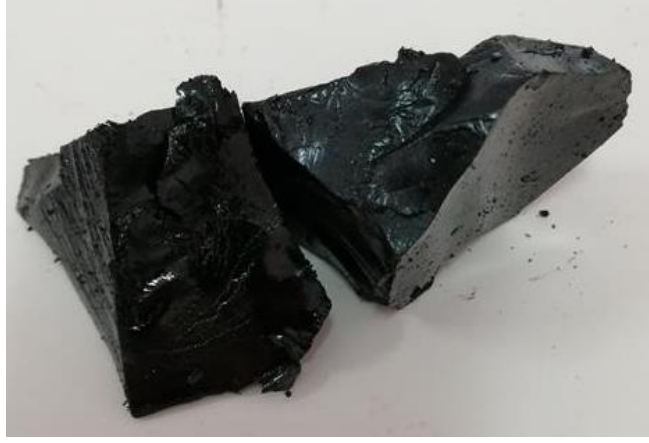
Çalışmada saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman Rafinerisi'nden temin edilen 160/220 penetrasyon dereceli bitüm kullanılmıştır. Saf bağlayıcının özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Saf bağlayıcıya ağırlıkça %20, %35 ve %50 doğal asfalt eklenmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapmak amacıyla saf bağlayıcı ağırlıkça %2 ve %4 SBS ile modifiye edilmiştir. Irak'tan doğal asfalt (Şekil 1) temin edilmiştir. Kullanılan SBS polimer tipi Kraton D-1101, Shell Chemicals Company'den tedarik edilmiştir. Saf bağlayıcı 1000 rpm'de dört bıçaklı bir mikser yardımıyla 170°C sabit sıcaklıkta 1 saat karıştırılarak modifiye edilmiştir (Şekil 2). Yaşlanma etkisini ortadan kaldırarak daha gerçekçi bir karşılaştırma yapmak için aynı karıştırma işlemleri saf bağlayıcıya da uygulanmıştır. Saf ve doğal asfaltın elementel analizi Tablo 2'de verilmiştir. Doğal asfalt, bazik içerik bakımından saf bitümden çok farklı değildir. Saf bitüm "pure" ile ifade edilmiştir. Saf bitüm ağırlığına göre sırasıyla %20, %35 ve %50 doğal asfalt ile modifiye edilmiş bağlayıcılar 20NA, 35NA ve 50NA ile temsil edilmiştir. Saf bitüm ağırlığının %2 ve %4 SBS ile modifiye edilen bağlayıcılar sırasıyla 2SBS ve 4SBS ile temsil edilmiştir.

**Tablo 1.** Saf bağlayıcı özellikleri

	<b>Standart</b>	<b>B 160/220</b>
<b>Penetrasyon (0.1 mm), 100 g, 5 s</b>	ASTM D5	206
<b>Yumuşama noktası (°C)</b>	ASTM D36	42.1
<b>Penetrasyon indeksi (PI)</b>		1.038
<b>Özgül ağırlık</b>	ASTM D70	1.019
<b>Viskozite (cP, 135°C)</b>	ASTM D4402	262.5
<b>Viskozite (cP, 165°C)</b>	ASTM D4402	100

**Tablo 2.** Saf bitüm ve doğal asfaltın elementel analizi.

	C(%)	H(%)	N(%)	S(%)	TCE'de çözünürlük (%)
<b>Saf bitüm</b>	82.38	8.96	0.604	7.227	99.21
<b>Doğal asfalt</b>	81.52	10.82	0.455	5.914	97.95



**Şekil 1.** Doğal asfalt.



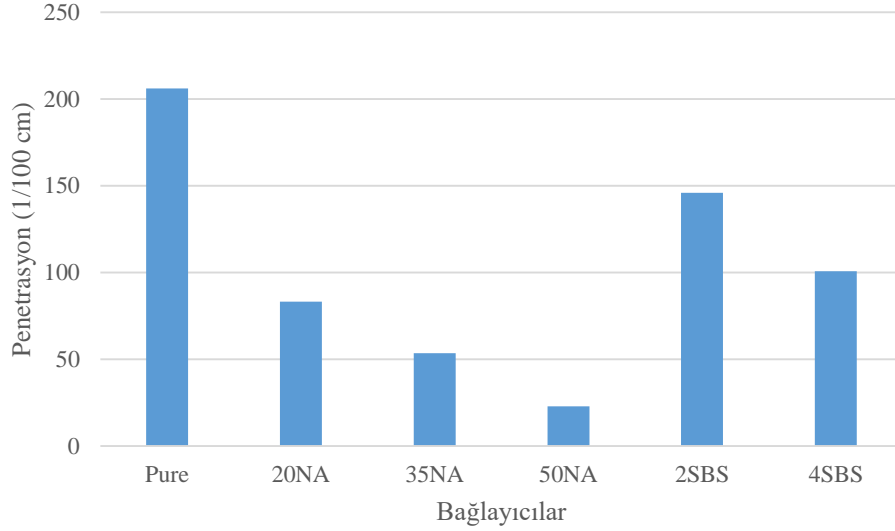
**Şekil 2.** Bağlayıcı modifikasyon aleti.

### 3. Uygulanan Deneyler ve Sonuçları

#### 3.1. Penetrasyon deneyi ve sonuçları

Bu test ASTM D5 standardına göre yapılmıştır. Belirtilen boyutlarda bir iğnenin 5 saniye boyunca 25°C'de sabit bir yük (100g) altında bitüm içine batmasına izin verilmiştir. İğne batma mesafesi (0.1 mm) penetrasyon olarak kabul edilir. Penetrasyon deneyinin sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. NA penetrasyon değerlerinde önemli bir düşüşe neden olmuştur. NA saf bağlayıcı üzerinde sertleştirici bir etkiye sahiptir. Penetrasyon değerleri ilk

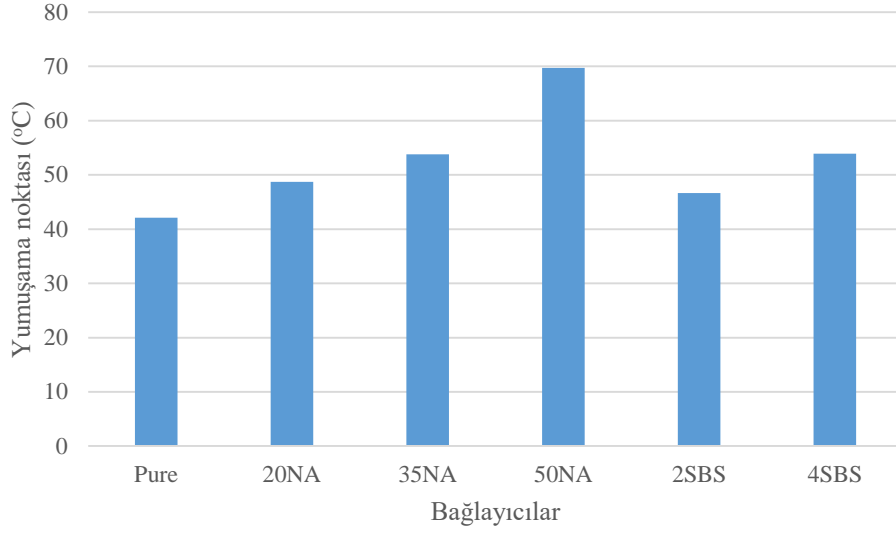
başta hızla azalır ve daha sonra NA içeriğinin artmasıyla azalmaya başlar. %20, %35 ve %50 NA modifikasyonu, saf bağlayıcının penetrasyon değerini sırasıyla %59, %74 ve %88 azaltmıştır. SBS modifikasyonunun, NA modifikasyonundaki kadar sertleştirici etkisi yoktur. %4 SBS modifikasyonu, saf bağlayıcının penetrasyonunu sadece %50 azaltmıştır. %2 ve %4 SBS ile modifiye edilmiş bağlayıcılar penetrasyon değerleri açısından, sırasıyla %10 ve %18 NA modifiye bağlayıcılara eşdeğerdir.



Şekil 3. Bağlayıcıların penetrasyon değerleri.

### 3.2. Yumuşama noktası deneyi ve sonuçları

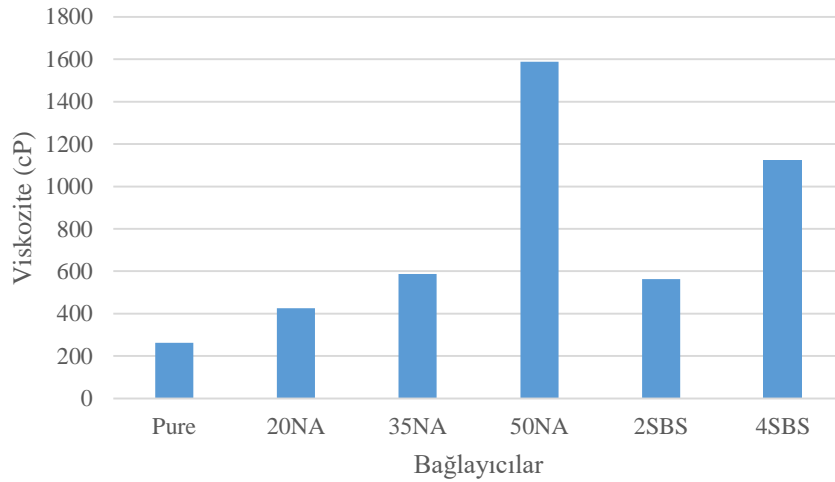
Test ASTM D36 standardına göre yapılmıştır. Saf ve modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Doğal asfalt modifikasyonunun yumuşama noktası üzerinde büyük etkisi vardır. %20, %35 ve %50 NA modifikasyonu, saf bağlayıcının yumuşama noktasını sırasıyla %15, %28 ve %66 artırmıştır. Doğal asfaltın %50 oranında kullanılması, yumuşama noktasında önemli bir artışa neden olmuştur. 50NA bağlayıcısı, 4SBS bağlayıcısından 15.3°C daha yüksek yumuşama noktası vermiştir. %2 ve %4 SBS modifikasyonu, saf bağlayıcının yumuşama noktasını sırasıyla %10 ve %29 oranında artırmıştır. %2 ve %4 SBS modifikasyonunun yumuşama noktasının, sırasıyla %17 ve %33 doğal asfalt modifikasyonu ile elde edilebilir. 50NA bağlayıcısının, içinde kullanıldığı bitümlü karışım tabakalarının kalıcı deformasyona karşı direncini önemli derecede artıracığı söylenebilir.



Şekil 4. Bağlayıcıların yumuşama noktaları.

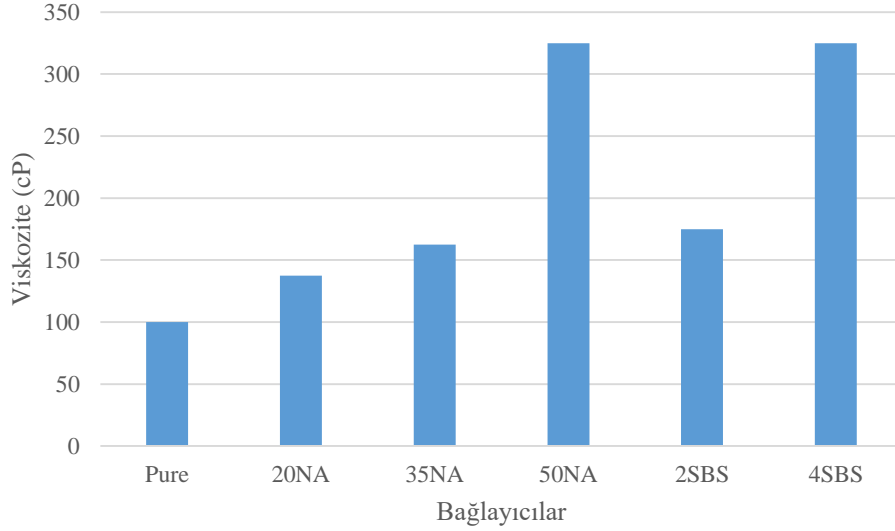
### 3.3. Dönel viskozite deneyi ve sonuçları

Test ASTM D4402 standardına göre Brookfield DV-III dönel viskozimetre aletiyle yapılmıştır. Bağlayıcıların viskozite değerlerinin 135°C ve 165°C'deki değişimleri Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Saf bitümün viskozitesi, NA içeriğinin artmasıyla birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Bununla birlikte, 3000 cP viskozite değeri, en yüksek NA içeriğinde bile aşılmamıştır. Bu nedenle, %50 NA modifiyeli bağlayıcının kullanımında işlenebilirlik problemi yoktur. Viskozite artışı, %35 NA içeriğinden sonra daha belirgindir. 135°C'deki viskozite değerleri, sırasıyla %20, %35 ve %50 NA kullanımında saf bağlayıcı viskozitesine kıyasla 1.62, 2.24 ve 6.06 kat artmıştır. %2 SBS ve %4 SBS'nin viskozite değerleri, 135°C'de %30 NA ve %43 NA ile elde edilebilir. Bu oranlar 165°C'de %33 NA ve %50 NA olarak belirlenmiştir. SBS modifikasyonu ile aynı viskoziteyi sağlayacak NA miktarı, 165°C için 135°C'ye kıyasla daha yüksektir. Bu, NA modifikasyonunun SBS modifikasyonu kadar sıcaklık direnci olmadığını göstermektedir. Saf bağlayıcı ile %50 NA kullanımının, herhangi bir işlenebilirlik problemi olmadan kalıcı deformasyona direnç açısından %4 SBS modifikasyonuna kıyasla daha iyi veya aynı performans gösterebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5. 135°C'de bağlayıcıların viskoziteleri.





Şekil 6. 165°C'de bağlayıcıların viskoziteleri

### 3.4. Sıcaklık hassasiyetinin değerlendirilmesi

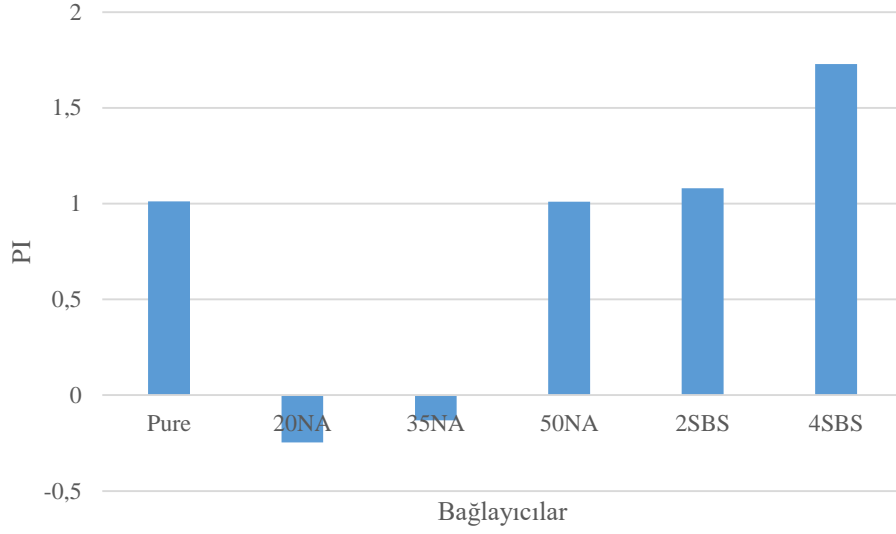
Saf ve modifiye bağlayıcıların sıcaklık hassasiyeti Penetrasyon indeksi (PI), Penetration Viscosity Number (PVN) ve Viscosity Temperature Susceptibility (VTS) ile değerlendirilmiştir.

Penetrasyon indeksi değeri, asfalt bağlayıcıların sıcaklık değişikliklerine tepkisinin nicel bir boyutunu temsil eder. Penetrasyon indeksi değerlerindeki azalma, sıcaklık duyarlılığındaki artışın bir göstergesidir [9]. Bitümlü bağlayıcının termal hassasiyetini belirlemek için, penetrasyon indeksi (PI), bağlayıcının yumuşama noktası ve standart penetrasyon testi sonuçları kullanılarak belirlenir. Penetrasyon indeksi değerini elde etmek için penetrasyon ve yumuşama noktası ile ilişkili klasik bir yaklaşım Formül 1'de gösterildiği gibi verilmiştir [10].

$$\text{Penetrasyon indeksi (PI)} = \frac{1952 - 500 \log(\text{Pen}25) - 20 \text{ SP}}{50 \log(\text{Pen}25) - \text{SP} - 120} \quad (1)$$

Formülde, P25 değeri 25°C'de bitüm penetrasyonunu temsil ederken SP bitümün yumuşama noktası sıcaklığını gösterir.

Şekil 7'de bağlayıcıların PI değerlerinin değişimi verilmiştir. 4% SBS kullanımı saf bağlayıcının PI değerini %71 artırmaktadır. 2SBS bağlayıcısı saf bağlayıcıya çok yakın PI değerine sahip olmuştur. Bunun yanı sıra doğal asfaltın kullanımı bağlayıcıların PI değerini azaltmıştır. Bu azalışın etkisi yüksek %50 NA içeriğinde gözlenmemiştir. En büyük azalış 20NA bağlayıcısında görülürken, 50NA bağlayıcısı saf bağlayıcıya çok yakın PI değeri vermiştir. PI değerleri ve sıcaklık hassasiyeti arasında ters orantı olduğu düşünüldüğünde, 20NA bağlayıcısının en yüksek sıcaklık hassasiyetine sahipken 4SBS bağlayıcısı en düşük sıcaklık hassasiyetine sahip olmuştur.



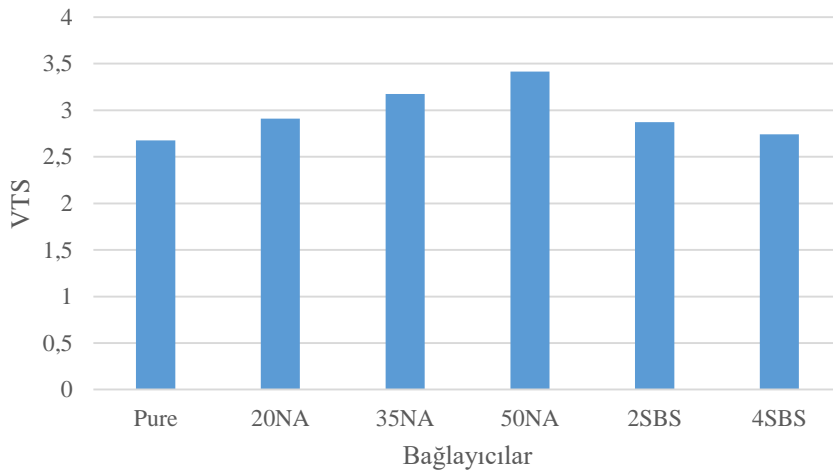
**Şekil 7.** Bağlayıcıların PI değerleri.

Bir bağlayıcının yüksek sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık değişimi ile birlikte hızlı bir viskozite değişimi anlamına gelir. Viskozite-Sıcaklık Duyarlılığını (VTS) hesaplamak için Formül 2 kullanılmaktadır [11].

$$VTS = \frac{\log \log (V1) - \log \log (V2)}{\log (T2) - \log (T1)} \quad (2)$$

Formülde, T1 ve T2 bilinen noktalardaki bağlayıcı sıcaklıkları (Kelvin) iken V1 ve V2 bilinen noktalardaki ilgili bağlayıcı viskoziteleridir (cP).

Şekil 8'de bağlayıcıların VTS değerleri verilmiştir. Buradaki değerler 135°C ve 165°C'deki viskozite değerlerine göre hesaplanmıştır. VTS değerleri ile sıcaklık hassasiyeti arasında doğru orantı mevcuttur. Her bir katkı içeriğinin artışı VTS değerlerini artırmakta ve daha yüksek bir sıcaklık hassasiyetine neden olmaktadır. VTS değerleri dikkate alındığında modifiye bağlayıcılar içinde sıcaklık hassasiyeti en iyi olan 4SBS iken sıcaklık hassasiyeti en kötü olan 50NA bağlayıcısı olmuştur. Saf bağlayıcıya %50 NA eklenmesi VTS değerini %27 artırmıştır. 20NA ve 2SBS bağlayıcıları benzer VTS değerleri vermiştir.



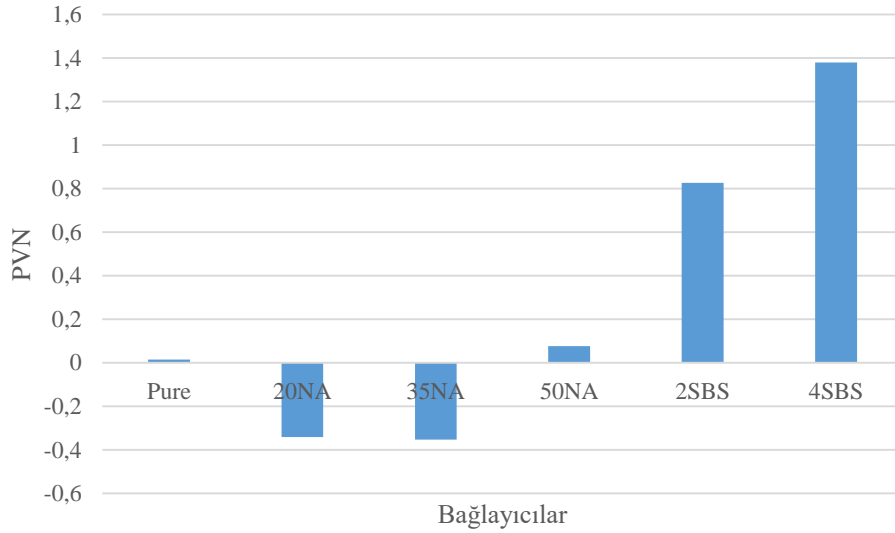
**Şekil 8.** Bağlayıcıların VTS değerleri.

Penetrasyon-Viskozite Sayısı (PVN), asfalt bağlayıcı ile düşük sıcaklık çatlama performansı arasında ampirik bir ilişkidir. PVN yöntemi, bir asfalt bağlayıcısının sıcaklık duyarlılığını ölçmek ve düşük sıcaklıkta çatlama önleme yeteneğini tahmin etmek için kullanılır. Daha düşük PVN değerleri daha yüksek sıcaklık duyarlılığını gösterir ve daha düşük sıcaklık duyarlılığına sahip bağlayıcılar içeren asfalt karışımları çatlama karşı daha dayanıklıdır [7]. Asfalt bağlayıcısının PVN değeri aşağıdaki Formül 3 kullanılarak hesaplanabilir [12].

$$PVN = -1.5 \frac{4.258 - 0.7967 \log P25 - \log V}{0.795 - 0.1858 \log P25} \quad (3)$$

Formülde, P25 değeri bağlayıcının 25°C'deki penetrasyonunu, V değeri bağlayıcının 135°C'deki viskozitesini (cP) temsil eder.

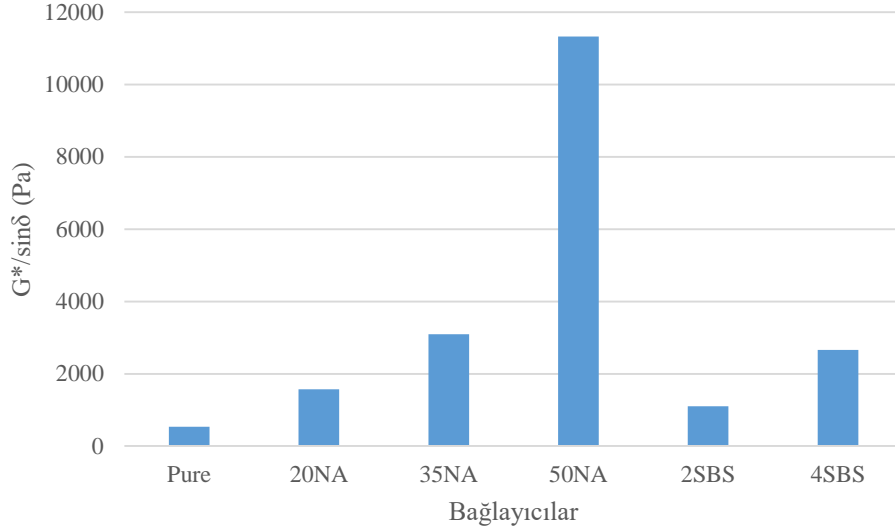
Şekil 9'da bağlayıcıların PVN değerleri verilmiştir. PVN değerlerinin yüksek olması PI değerlerinde olduğu gibi düşük sıcaklık hassasiyetine işaret etmektedir. Bu bağlamda 4% SBS modifiyeli bağlayıcı sıcaklık hassasiyeti en düşük bağlayıcı olarak görülmektedir. 20NA ve 35NA bağlayıcıları saf bağlayıcıdan daha kötü sıcaklık hassasiyeti göstermiştir. Yüksek oranda (%50) NA kullanımı PVN eğilimini tersine çevirmiştir. 50NA bağlayıcısı saf bağlayıcının 0.01 olan PVN değerini 0.07'ye çıkarmıştır.



Şekil 9. Bağlayıcıların PVN değerleri.

### 3.5. Dinamik kayma reometresi deneyi ve sonuçları

Deney AASHTO T315 standardına uygun olarak yapılmıştır. Saf ve modifiye bağlayıcılara 64°C'de 1.59 Hz kesme hızında DSR deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir. Katkı kullanımı saf bağlayıcının tekerlek izi parametresini ( $G^*/\sin\delta$ ) artırmıştır. 4SBS bağlayıcısı saf bağlayıcıdan 4.9 kat daha fazla tekerlek izi parametresi vermiştir. NA modifiyeli bağlayıcılarda katkı içeriğinin artması ile tekerlek izi parametresi önemli derecede artmaktadır. VTS değeri en düşük olan 50NA bağlayıcısının tekerlek izi parametresi 4SBS bağlayıcısının tekerlek izi parametresinin 4.3 katı çıkmıştır. Sıcaklık hassasiyeti bakımından iyi bir performans sergileyemeyen NA katkılı bağlayıcılar, kalıcı deformasyon direnci bakımından önemli bir iyileşme sağlamaktadır. Sıcaklık farklılıklarının fazla olmadığı bölgelerde NA modifiyeli bağlayıcılarla üretilen kaplamaların ağır trafik koşullarına iyi bir şekilde direnç gösterebileceği tespit edilmiştir.



Şekil 10. Bağlayıcıların tekerlek izi parametreleri.

#### 4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada, Irak'ın Zaho bölgesinden çıkarılan doğal asfalt (NA) ile modifiye edilen bitümünün özellikleri araştırılmıştır. NA modifiyeli bağlayıcıların özellikleri, SBS modifiyeli bağlayıcılar ile karşılaştırılmıştır.

Saf bitüme NA ilavesi penetrasyon değerlerinde önemli bir düşüşe neden olmuştur. SBS modifikasyonunun, NA modifikasyonundaki kadar sertleştirici etkisi yoktur. Doğal asfalt modifikasyonunun yumuşama noktası üzerinde büyük etkisi vardır. %20, %35 ve %50 NA modifikasyonu, saf bağlayıcının yumuşama noktasını sırasıyla %15, %28 ve %66 artırmıştır. %50 NA modifiyeli bağlayıcı, %4 SBS modifikasyonundan 15.3°C daha yüksek yumuşama noktası vermiştir. Saf bitümün viskozitesi, NA içeriğinin artmasıyla birlikte önemli ölçüde artmıştır. %2 SBS ve %4 SBS'nin 135°C'deki viskozite değerleri, %30 NA ve %43 NA ile elde edilebilmektedir. PI, PVN ve VTS değerlerinin her üçüne göre de %4 SBS modifiyeli bağlayıcı sıcaklık duyarlılığı en düşük bağlayıcı olmuştur. Bunun yanı sıra doğal asfaltın kullanımı sıcaklık hassasiyeti bakımından kabul edilebilir sınırlar içinde kalınmasını temin etse de SBS modifikasyonu kadar başarılı olamamış hatta PI ve PVN değerlerine göre %20 ve %35 NA kullanımı saf bağlayıcının sıcaklık hassasiyetini kötüleştirmiştir. VTS değerleri dikkate alındığında modifiye bağlayıcılar içinde sıcaklık hassasiyeti en iyi olan 4SBS iken sıcaklık hassasiyeti en kötü olan 50NA bağlayıcısı olmuştur. 20NA ve 2SBS bağlayıcıları benzer VTS değerleri vermiştir. DSR deney sonuçlarına göre %4 SBS modifiyeli bağlayıcı saf bağlayıcıdan 4.9 kat daha fazla tekerlek izi parametresi vermiştir. NA modifiyeli bağlayıcılarda katkı içeriğinin artmasıyla tekerlek izi parametresi önemli derecede artmaktadır. %50 NA modifiyeli bağlayıcının tekerlek izi parametresi %4 SBS modifiyeli bağlayıcının tekerlek izi parametresinin 4.3 katı çıkmıştır.

Sıcaklık hassasiyeti bakımından kabul edilebilir sınırlar içinde kalan ancak SBS modifikasyonuna göre iyi bir performans sergileyemeyen NA katkılı bağlayıcılar, kalıcı deformasyon direnci bakımından önemli bir iyileşme sağlamaktadır. Sıcaklık farklılıklarının fazla olmadığı bölgelerde NA modifiyeli bağlayıcılarla üretilen kaplamaların ağır trafik koşullarına iyi bir şekilde direnç gösterebileceği ve ayrıca önemli ekonomik kazanç sağlayacağı tespit edilmiştir.

#### Teşekkür

Yazarlar, MF.19.17 numaralı Performans Projesine verdikleri destek için Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) Koordinasyon Birimi'ne teşekkür eder. B. V. K., fikir sahibi, Y.E. deneyleri gerçekleştirdi B. V. K. ve M.Y. sonuçları yorumladı, Y.E., makaleyi yazdı.

### Kaynaklar

- [1] Meyer RF, Witt W. Definition and world resources of natural bitumens. U.S. Geological Survey Bulletin 1990; 1-14.
- [2] Shi X, Cai L, Xu W, Fan J, Wang X. Effects of nano-silica and rock asphalt on rheological properties of modified bitumen. Constr Build Mater 2018; 161: 705-714.
- [3] He R, Zheng S, Chen H, Kuang D. Investigation of the physical and rheological properties of Trinidad lake asphalt modified bitumen. Constr Build Mater 2019; 203: 734-739.
- [4] Huang W, Xu G. Anti-rutting performance analysis of asphalt mixture with different natural asphalt. Blucher Mechanical Engineering Proceedings 2012; 1(1): 4755-4759.
- [5] Aflaki S, Tabatabaee N. Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran. Constr Build Mater 2009; 23: 2141-2150.
- [6] Ameri M, Mansourian A, Ashani SS, Yadollahi G. Technical study on the Iranian Gilsonite as an additive for modification of asphalt binders used in pavement construction. Constr Build Mater 2010; 25: 1379-1387.
- [7] Erdoğan Yamaç Ö, Yılmaz M, Kök B.V. Effects of the combined use of styrene-butadiene-styrene and gilsonite in bitumen modification on the stiffness and thermal sensitivity of bitumens. Turkish Journal of Science and Technology 2018; 13(1): 77-85.
- [8] Kök BV, Yılmaz M, Guler M. Evaluation of high temperature performance of SBS+ Gilsonite modified binder. Fuel 2011; 90(10): 3093-3099.
- [9] Erkuş Y, Kök B.V, Yılmaz M. Effects of graphite on rheological and conventional properties of bituminous binders. International Journal of Pavement Research and Technology 2017; 10(4): 315-321.
- [10] Saoula S, Soudani K, Haddadi S, Munoz ME, Santamaria A. Analysis of the rheological behavior of aging bitumen and predicting the risk of permanent deformation of asphalt. Materials Sciences and Applications 2013; 4: 312-318.
- [11] Rasmussen RO, Lytton RL, Chang GK. Method to predict temperature susceptibility of an asphalt binder. Journal of Materials in Civil Engineering 2002; 14(3): 246-252.
- [12] McLeod NW. Asphalt cements: pen-vis number and its application to moduli of stiffness. J Test Eval 1976; 4(4): 275-282.

## ***Chlorella vulgaris* Mikroalgi Kullanılarak Biyofotovoltaik Hücrede Güç Yoğunluğunun Araştırılması**

**Merve BAKIR<sup>1</sup>, Ergin TAŞKAN<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye

<sup>2</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye

<sup>1</sup> mervebkrb@gmail.com, <sup>2</sup> etaskan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16/06/2020;

Kabul/Accepted: 27/11/2020)

**Özet:** Bu çalışmada laboratuvar ölçekli bir biyofotovoltaik hücre (BFVH) kullanılarak *Chlorella vulgaris* mikroalginin elektrik üretim kapasitesi araştırılmıştır. BFVH’de anot materyali olarak kalay oksit kaplı bakır mesh elektrot, katot materyali olarak ise platin kaplı titanyum mesh elektrot kullanılmıştır. BFVH’de üretilen maksimum güç yoğunluğu 142,28 mW/m<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Nyquist analizi sonucunda anot biyofilm direncinin 0,74 Ω olduğu belirlenmiştir. BFVH’nin işletme süresi sonunda anot elektrotu yüzeyinden alınan SEM görüntülerinde yoğun bir biyofilm yapısının mevcut olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, BFVH’nin elektrik üretim performansının literatür değerleri ile kıyaslanabilir düzeyde olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Biyofotovoltaik hücre, *Chlorella vulgaris*, Elektrik üretimi, Güç yoğunluğu

### **Investigation of Power Density in Biophotovoltaic Cell by Using *Chlorella vulgaris* Microalgae**

**Abstract:** In this study, the electricity generation capacity of *Chlorella vulgaris* was investigated by using a lab scale biophotovoltaic cell (BPVC). Tin oxide coated copper mesh and platinum coated titanium mesh were used as anode and cathode electrode in BPVC. The maximum power density of BPVC was obtained as 142.28 mW/m<sup>2</sup>. Nyquist result demonstrated that anode biofilm resistance was 0.74 Ω. It was detected from the SEM images that a thick biofilm layer present on anode electrode, which was taken at the end of the operation period of BPVC. The results showed that the electricity generation performance of BPVC is compatible with the literature values.

**Key words:** Biophotovoltaic cell, *Chlorella vulgaris*, Electricity generation, Power density

### **1. Giriş**

Biyofotovoltaik hücre (BFVH), fotosentetik organizmaları kullanarak ışık enerjisi ile suyun parçalanması sonucu üretilen elektronların kullanımı prensibine dayanan bir biyoelektrokimyasal sistemdir [1]. Yenilikçi bir sistem olan BFVH’ler elektrik üretimi için temel olarak ışık ve suyu kullanarak herhangi bir atık oluşumuna sebep olmazlar. Mikrobiyal yakıt hücreleri (MYH) ve anaerobik enerji üretme yöntemlerinden farklı olarak bir BFVH, enerji üretimini karbondioksit (CO<sub>2</sub>) üretimi olmadan ışık enerjisini kullanarak gerçekleştirir [1]. Bu nedenle BFVH’ler; çevre dostu, düşük maliyetli ve neredeyse her ortamda elektrik üretim yeteneğine sahip olması gibi birçok avantaja sahiptir. BFVH’lerin çalışma prensibi, MYH’ye çok benzerdir. BFVH’ler klasik MYH sistemlerine benzer olarak anot bölgesi, katot bölgesi ve her iki bölmeyi birbirinden ayıran proton değişim membranından (PDM) oluşmaktadır. BFVH’ler suyu (H<sub>2</sub>O) yakıt olarak kullanıp elektrik üretimi ile birlikte oksijen (O<sub>2</sub>) üretimi sağlarlar. BFVH’lerde anot elektrotu yüzeyinde fotosentetik organizmalar bulunur ve ışık enerjisini kullanarak suyun oksidasyonunu gerçekleştirirler. Fotosentez sırasında adenozin trifosfat (ATP) ve nikotinamid adenin dinükleotid fosfat (NADPH<sub>2</sub>) üretimi için ihtiyaç duyulan hidrojen ve elektronları elde etmek için su parçalanır. Elde edilen elektronlar (e<sup>-</sup>) anot yüzeyine aktarılır ve su oluşturmak için indirgeyici elektrotta (katot) hidrojen (H<sup>+</sup>) ve oksijen (O<sub>2</sub>) ile yeniden birleşmek amacı ile dış direnç üzerinden hareket eder. Üretilen elektronlar bazı durumlarda, düşük elektrik enerjisine ihtiyaç duyan elektronik cihazları çalıştırmak için yeterli olabilmektedir [2]. BFVH’lerin elektrik üretimi, MYH ve foto-MYH’lerde üretilen elektrik miktarına göre oldukça düşük olmasına rağmen bu sistemlerin sürdürülebilirliği diğer sistemlere göre oldukça yüksektir. Bu nedenle son yıllarda araştırmacılar, BFVH çalışmalarına daha fazla önem vermiştir. Bu amaçla günümüzde, farklı fotosentetik organizmaların farklı elektrot malzemeleri ile arasındaki elektrokimyasal etkileşimlerin daha iyi anlaşılması ve daha yüksek güç verimine ulaşmak için BFVH’ler bilim insanları tarafından önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [3]. Literatürde yapılmış çalışmalarda; ışık [4, 5], sıcaklık [6, 7], pH [8], iletkenlik [9], medyatör

\* Sorumlu yazar: [etaskan@firat.edu.tr](mailto:etaskan@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-3300-8773, <sup>2</sup> 0000-0002-9620-8644

konsantrasyonu [10], nütrient konsantrasyonu [11], CO<sub>2</sub> [12] ve biyokütle konsantrasyonu [13] gibi çevresel faktörlerin BFVH'nin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şu ana kadar yapılmış birçok çalışmada siyanobakteriler saf ve karışık kültür olacak şekilde BFVH sisteminde kullanılmıştır [5, 14]. En yaygın olarak kullanılan tür bir model organizma olan *Synechocystis* sp. *PCC6803* olmakla birlikte *Synechococcus elongatus* *PCC7942* ve *Nostoc* gibi türler de BFVH'de kullanılarak elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir [15]. Ayrıca BFVH sistemlerinde siyanobakteri türlerine ilave olarak *Chlamydomonas* [16], *Chlorella* [17], *Dunaliella* [9] gibi yeşil algler veya *Phaeodactylum tricornutum* ve *Thalassiosira pseudonana* [18] gibi diatom türleri kullanılmıştır.

BFVH sistemlerinde kullanılacak anot elektrotu yüksek elektriksel iletkenliğe, fotosentetik mikroorganizmalar ile biyolojik uyumluluğa, kimyasal stabiliteye (dayanıklılık) ve yüksek spesifik yüzey alanına sahip olmalıdır. Ayrıca anot elektrotunun yüzey morfolojisi, biyofilm oluşturma özelliği bakımından oldukça önemlidir. Karbon elektriksel iletkenliği, maliyetinin düşük olması ve farklı şekillerde kullanılabilme özelliklerinden dolayı BFVH'lerde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Karbon elektrotlar karbon bez [15] karbon nanotüp [19], grafit [20] ve indirgenmiş grafit oksit [17] olarak BFVH'de anot malzemesi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, paslanmaz çelik, bakır, platin ve kalay oksit gibi malzemeler de BFVH sistemlerinde elektrot malzemesi olarak kullanılmıştır [21]. Son yıllarda indiyum-Kalay-Oksit (ITO) elektrotlar BFVH'lerde yaygın bir şekilde kullanılmış ve karbon elektrotlardan daha iyi bir performans sağladığı rapor edilmiştir [22]. Saar, ve ark. [23] tarafından yapılmış bir çalışmada molten InBiSn tarafından üretilmiş Indalloy® anot kullanılarak genetik olarak modifiye edilmiş *Synechocystis* türü ile BFVH'de 530 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde edilmiştir [23]. Bu değere en yakın güç değeri Liu ve Choi [24] tarafından *Synechocystis* türü ve karbon kumaş elektrotun kullanıldığı BFVH ile 438 mW/m<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. BFVH'de güç üretimini etkileyen en önemli faktörlerden bir diğeri de katot malzemesidir. BFVH'lerin katot bölmesinde elektron alıcı olarak genellikle oksijen kullanılmaktadır. Biyoelektrokimyasal sistemlerde katalitik etkisinden dolayı platinin kullanılması oksijenin indirgenmesini ciddi ölçüde hızlandırmaktadır [25].

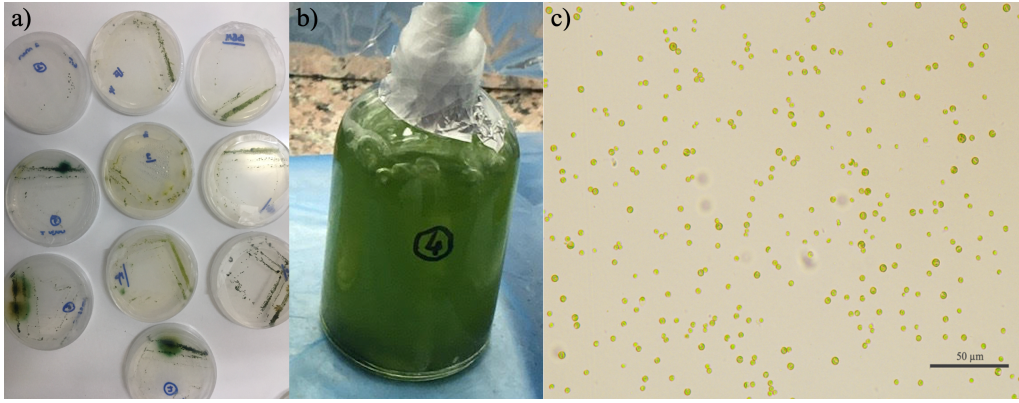
Bu çalışmada, çift bölmeli bir BFVH'de yeni bir elektrot kombinasyonu kullanılarak *Chlorella vulgaris* mikroalgi ile elektrik üretim performansı elektrokimyasal ve mikroskopik analizler kullanılarak detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Yüksek güç yoğunluğuna ulaşmak amacıyla BFVH'ler için yeni bir elektrot kombinasyonu olan kalay oksit kaplı bakır mesh anot ve platin kaplı titanyum mesh katot kullanılmıştır. Bu çalışma, söz konusu elektrot kombinasyonlarının BFVH sisteminde kullanımı açısından literatürdeki ilk çalışmadır. Özellikle anot elektrotu olarak kullanılan kalay oksit kaplı bakır mesh elektrot, yüksek elektriksel iletkenliğe ve mesh yapısı nedeni ile iyi bir biyofilm oluşturma yeteneğine sahiptir. Platin kaplı titanyum mesh ise yüksek elektriksel iletkenliği ve kimyasal stabilitesinden dolayı BFVH'de katot malzemesi olarak oldukça uygundur.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Alg kültürü ve izolasyonu

Çalışmada elektrojenik mikroorganizma olarak *Chlorella vulgaris* türü kullanılmıştır. *Chlorella vulgaris* bir yeşil alg olup yüksek miktarda klorofil içeriğine sahiptir [26]. *Chlorella vulgaris* hücrelerinin ortalama boyutu 5-10 µm aralığındadır. *Chlorella vulgaris* yeşil renkli ve küresel şekillidir (Şekil 1c). *Chlorella vulgaris* türünün hızlı büyüme oranına sahip olması, büyüme şartlarının literatürde hali hazırda mevcut olması ve elektrojenik aktivitesinin ispatlanmış olması nedeniyle bu çalışmada BFVH sisteminde kullanılmıştır [27].

Çalışmada kullanılan *Chlorella vulgaris* türünün izolasyonu için Elazığ Kehli deresinden (38°35'36.3"N 39°20'23.6"E) alınan su numunesi kullanılmıştır. Alınan numune Tablo 1'de içeriği verilen mineral tuz ortamına [28] aşılanmış ve 25 °C sıcaklıkta 12 saat aydınlık/karanlık şartlarda 2000 lux ışık yoğunluğu altında 15 gün süreyle kültürlenmiştir. Bu işlemten sonra kültürlenmiş sıvıdan Bold Basal Medium (BBM) çözeltisi [29] içeren agarlı besi ortamına (15 g/L agar agar) ekim yapılmış ve 15 gün süre ile aynı şartlar altında tekrar kültürlenip koloni oluşumu gözlenmiştir (Şekil 1a). Elde edilen tek koloniler şekilsel olarak incelenmiş ve farklı yapıda olan koloniler steril öze yardımı ile alınarak moleküler analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen gen diziliminin analiz edilmesi sonucunda *Chlorella vulgaris* CCAP 211/11F (Katalog numarası: AY591515, Benzerlik oranı: %99) olduğu tespit edilen koloniden alınan algler 100 ml hacme sahip steril fotobiyoreaktör sisteminde (Şekil 1b) steril BBM besi yeri kullanılarak kültürlenmiştir. Elde edilen kültürden alınan numune Nikon Eclipse Ni-U (Nikon, Tokyo, Japan) mikroskopu kullanılarak 40x büyütmede gözlemlenmiş (Şekil 1c) ve sağlıklı kültür ortamının varlığı teyit edildikten sonra BFVH'nin anot bölmesine transfer edilmiştir.



Şekil 1. *Chlorella vulgaris* izolasyonu (a), kültürlenmesi (b) ve görüntülenmesi (c)

Tablo 1. Mineral çözelti içeriği [28].

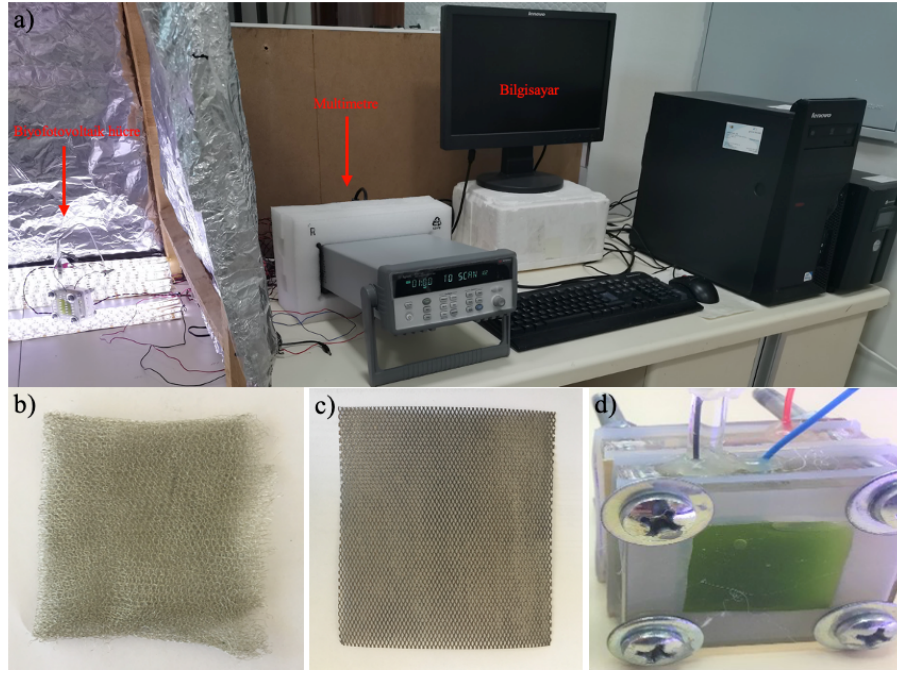
Kimyasal	Miktar (g/l)
KNO <sub>3</sub>	1,25
MgSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	0,625
CaCl <sub>2</sub> . 2H <sub>2</sub> O	0,1105
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,1142
FeSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	0,0498
ZnSO <sub>4</sub> . 7H <sub>2</sub> O	0,0882
MoO <sub>3</sub>	0,0071
MnCl <sub>2</sub> . 4H <sub>2</sub> O	0,0144
CuSO <sub>4</sub> . 5H <sub>2</sub> O	0,0157
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O	0,0049
EDTA	0,5
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0,6247
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1,3251

## 2.2. BFVH kurulumu ve işletimi

Çalışmada kullanılan BFVH sistemi ve ölçüm düzeneği Şekil 2a'da verilmiştir. BFVH'de anot malzemesi olarak kalay oksit kaplı bakır mesh (LessEMF.com) elektrot (Şekil 2b), katot malzemesi olarak platin kaplı titanyum mesh (FuelCellStore.com, USA) elektrot (Şekil 2c) kullanılmıştır. BFVH her bir bölmenin etkin hacmi 10 ml olacak şekilde pleksiglas malzeme kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 2d). Elektrokimyasal analizlerin gerçekleştirilmesi için anot bölgesine referans (Ag/AgCl) elektrot yerleştirilmiştir. Anot ve katot bölmeleri birbirinden fiziksel olarak proton değişim membranı (PDM) kullanılarak ayrılmış ve bu sayede hidrojen iyonlarının (H<sup>+</sup>) katot bölgesine transferi gerçekleştirilmiştir. PDM olarak Ultrex CMI-7000 (Membranes International Inc. USA) membranı kullanılmış ve üretici firmanın vermiş olduğu şartlandırma prosedürü (40 °C sıcaklıkta %5'lik NaCl çözeltisinde 24 saat) uygulandıktan sonra reaktörde kullanılmıştır. Anot ve katot bölmeleri cıvata yardımı ile sabitlenmiş ve her bir bölme arasında silikon conta kullanılarak sızdırmazlık sağlanmıştır. Anot ve katot elektrotları biri birine 1000 Ω'luk dış direnç kullanılarak sabitlenmiştir.

BFVH reaktörü işletmeye alınmadan önce anot bölgesi *Chlorella vulgaris* kültürü (kuru ağırlığı 3 g/L) ile katot bölgesi ise 50 mM fosfat tamponu ile doldurulmuştur. BFVH 10 gün süre ile 12 saat aydınlık/karanlık şartlarda işletilmiş ve üretilen voltaj dijital multimetre (Agilent 34410A, USA) kullanılarak 3 dk aralıklarla online olarak ölçülmüş ve bir bilgisayar yardımı ile kayıt altına alınmıştır.





**Şekil 2.** Çalışmada kullanılan BFBVH sisteminin şematik görünümü (a), kullanılan anot elektrotu (kalay oksit kaplı bakır mesh) (b), katot elektrotu (platin kaplı titanyum mesh) (c), laboratuvar ölçekli BFBVH reaktörü (d)

### 2.3. Elektrokimyasal analizler

BFBVH reaktöründe üretilen voltaj (Agilent 34970A, USA) multimetre kullanılarak ölçülmüş ve Agilent Benchlink Data Logger 3 V4.3 yazılımı ile on-line olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Elektrokimyasal empedans analizi (EIS) Gamry Interface 1000 potansiyostat (Gamry, Warminster, PA) kullanılarak, 5 mV genlikli sinyal ile 0,1 Hz-100 kHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir [30]. Elde edilen veriler kullanılarak BFBVH'nin farklı bileşenlerine ait direnç değerleri, Gamry Echem Analyst V6.25 yazılımı ile Chen, ve ark. [31] tarafından oluşturulan model kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 4b). Döngüsel voltametri (CV) ölçümleri üçlü elektrot sistemi; anot elektrotu (kalay oksit kaplı bakır mesh), katot elektrotu (platin kaplı titanyum mesh) ve referans elektrot (Ag/AgCl) kullanılarak -1V ile 0,75V aralığında 5 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir [30]. Döngüsel voltametri analizi işletme süresi sonunda anot sıvısı ve elektrot yüzeyinde biyofilm mevcut iken yapılmıştır. BFBVH'de üretilen maksimum güç değerini tespit etmek amacıyla doğrusal taramalı voltametri (LSV) analizi, 0,25 mV/s tarama hızında Ag/AgCl referans elektrotu kullanılarak gerçekleştirilmiştir [30]. Analiz sonucunda elde edilen değerler kullanılarak akım yoğunluğu değerlerine karşı güç yoğunluğu hesaplanmış ve BFBVH reaktörlerine ait polarizasyon ve güç eğrileri oluşturulmuştur. Elektrot yüzey alanına bağlı olarak akım yoğunluğu ( $A/m^2$ ) ve güç yoğunluğu ( $mW/m^2$ ) değerleri eşitlik (1) ve eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Akım yoğunluğu} = \frac{I(A)}{\text{elektrot yüzey alanı}(m^2)} \quad (1)$$

$$\text{Güç yoğunluğu} = \frac{I.V}{\text{elektrot yüzey alanı}(m^2)} \quad (2)$$

### 2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

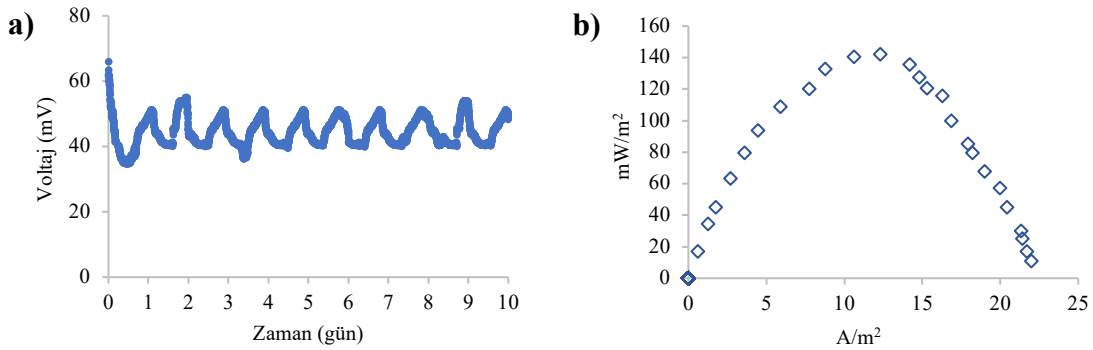
Taramalı elektron mikroskobu analizi için işletme süresi sonunda anot elektrotundan 1x1 cm boyutlarında bir parça kesilerek oda sıcaklığında kapalı bir ortamda bekletilerek elektrot yüzeyindeki biyofilm tabakasının kuruması sağlanmıştır. Kurutulmuş olan numunesinin daha iyi bir elektriksel iletkenliğe sahip olarak yüksek kalitede görüntü alınmasını sağlamak amacıyla analizden önce biyofilm numunesinin yüzeyi 20dk süreyle altınla

kaplanmış ardından Zeiss EVO MA-10 (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Germany) elektron mikroskobu ile görüntüleme işlemi yapılmıştır.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Elektrik üretim performansı

İşletme süresince sistemde üretilen voltaj değerlerinin 35-55 mV aralığında olduğu tespit edilmiştir. BfVH’de voltaj üretimi aydınlık ve karanlık şartlarda fotosentetik aktiviteye bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Aydınlatmanın olduğu süreçte üretilen voltaj değerlerinde artış meydana gelmiştir. Buna karşılık karanlık süreçte elde edilen voltaj değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Bu durum, karanlık şartlarda fotosentetik aktivitenin azalması ile açıklanabilir. Çalışmada BfVH reaktöründe üretilen voltaj değerleri kullanılarak sistemde üretilen maksimum güç miktarını tespit etmek amacı ile oluşturulan güç eğrisi Şekil 3a ve Şekil 3b’de verilmiştir. BfVH reaktöründe üretilen maksimum güç yoğunluğu  $142,28 \text{ mW/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Bu değer, literatürde taranmış olan çalışmalarda elde edilen değerden daha yüksektir (Tablo 4).



Şekil 3. BfVH’de elde edilen voltaj (a) ve güç (b) eğrisi

Literatürde Senthilkumar, ve ark. [32] tarafından yapılmış bir çalışmada,  $\text{TiO}_2/\text{rGO}$  elektrot kombinasyonu kullanılmış ve *Chlorella vulgaris* türü ile  $34,66 \pm 1,3 \text{ mW/m}^2$ ’lik bir güç yoğunluğu elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada, Karthikeyan, ve ark. [33] *Chlorella vulgaris* türünü kullanarak  $\text{RuO}_2/\text{WO}_3/\text{CC}$ /Karbon kumaş elektrot kombinasyonu ile  $59,2 \text{ mW/m}^2$ ’lik güç yoğunluğu elde etmiştir. Thorne, ve ark. [22] tarafından *Chlorella vulgaris* türü kullanılarak yapılmış bir diğer çalışmada, FTO/karbon kumaş elektrot kombinasyonu kullanılmış ve BfVH’de  $24 \text{ mW/m}^2$ ’lik bir güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bombelli, ve ark. [34] yaptıkları çalışmada, InSnBi alaşım/Pt elektrot kombinasyonunu kullanmış ve *Synechocystis* sp. PCC 6803 türü ile  $105 \text{ mW/m}^2$ ’lik güç yoğunluğuna ulaşmışlardır. Lin, ve ark. [35] ise yaptıkları çalışmada *Spirulina platensis* türünü kullanmış ve Au mesh/grafit kumaş elektrot kombinasyonu ile  $10 \text{ mW/m}^2$  güç yoğunluğu elde etmiştir. Bu çalışmalara ilave olarak Sekar, ve ark. [19] BfVH’de üretilen elektrik üretimini arttırmak amacıyla 1,4-benzoquinone’ni mediyatör olarak kullanmış ve *Nostoc* sp ATCC 27893 türü ve karbon nanotüp anot kullanılarak  $2300 \text{ mA/m}^2$  gibi yüksek bir akım yoğunluğuna ulaşmıştır. Literatürde geleneksel BfVH’ler haricinde Bombelli, ve ark. [34] tarafından yapılan çalışmada bir mikroakışlı BfVH elektrik üretimi amacıyla kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada harici bir mediyatör ilavesi olmadan *Synechocystis* türü ve Indalloy® anot kullanılarak  $294 \pm 17 \text{ mW/m}^2$  güç yoğunluğu elde edilmiştir.

BfVH ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar Tablo 4’ de özetlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen güç yoğunluğu ( $142,28 \text{ mW/m}^2$ ) literatürde rapor edilen değerler ile kıyaslandığında oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum kullanılan yeni elektrot kombinasyonunun elektrik üretimine olumlu katkısı ile açıklanabilir. Kullanılan anot elektrotunun yüksek elektriksel iletkenliğinin yanında mesh yapısı, biyofilm oluşumunu ciddi oranda arttırmış yüksek güç yoğunluğunun elde edilmesini sağlamıştır. Katot elektrotu olarak önceki çalışmalarda kullanılan karbon kumaş ve grafit gibi karbon tabanlı elektrotlar oksijen indirgeme reaksiyonlarında yetersiz kalabilmektedir [25].

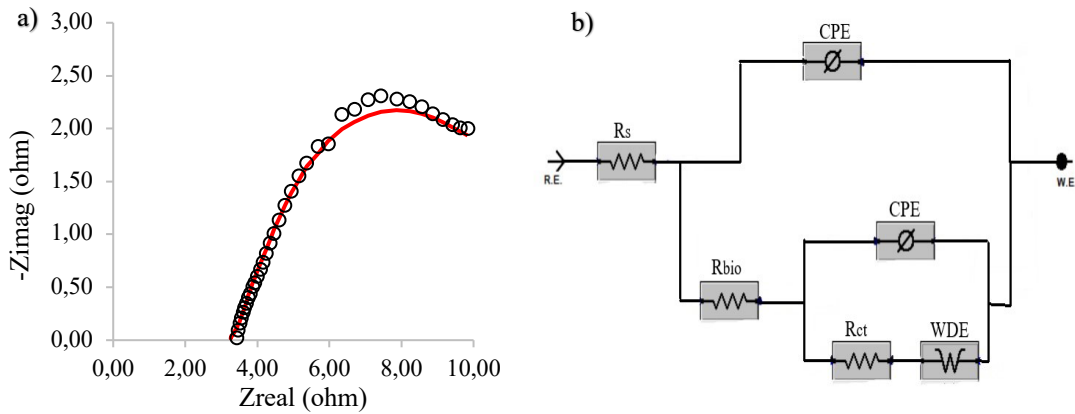
**Tablo 4.** BFVH ile ilgili literatür çalışmaları

Anot	Katot	Fotosentetik Mikroorganizma	Maksimum güç yoğunluğu (mW/m <sup>2</sup> )	Referans
TiO <sub>2</sub>	rGO	<i>Chlorella vulgaris</i>	34,66±1,3	[32]
RuO <sub>2</sub> /WO <sub>3</sub> /CC	Karbon kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	59,2	[33]
FTO	Karbon kumaş	<i>Chlorella vulgaris</i>	24	[22]
InSnBi alaşım	Pt	<i>Synechocystis</i> sp. <i>PCC 6803</i>	294±17	[34]
Au mesh	Grafit kumaş	<i>Spirulina platensis</i>	10	[35]
CNTCP	laccase on CNTCP	<i>Nostoc</i> sp.	35	[19]
ITO	Pt-C	<i>Oscillatoria Limnetica</i>	0,02	[36]
TiO <sub>2</sub>	CC	<i>Pauschulzia pseudovolvox</i>	6,2	[37]
Pre-treated Graphite	csc	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	12,947	[38]

Platin yüksek elektriksel iletkenliğe ve mekanik dayanıma sahip olmasından dolayı oksijen indirgeme reaksiyonlarında en etkili katalizörlerden biri olarak kabul edilir [25]. Bu çalışmada kullanılan platin kaplı titanyum mesh elektrotun oksijen indirgenme reaksiyonunda oldukça etkili olduğu elde edilen güç yoğunluğundan anlaşılabilir.

### 3.2. Elektrokimyasal Analiz Sonuçları

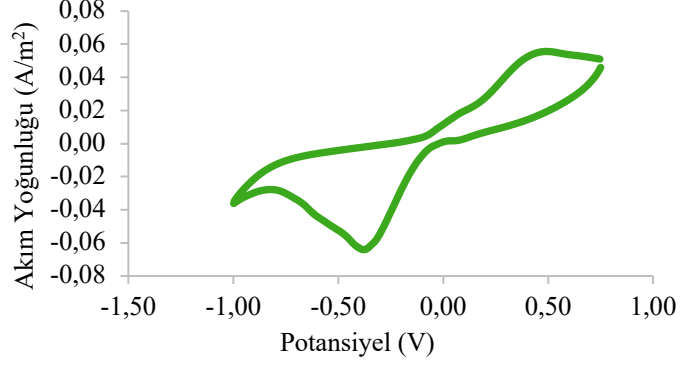
BFVH sisteminin iç direnci, güç üretimini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Bu amaçla BFVH sistemine EIS uygulanmış ve elde edilen sonuçlara Chen, ve ark. [31] tarafından verilen model uygulanarak BFVH’de anot elektrotuna ait direnç değerleri tespit edilmiştir. Nyquist diyagramı ve uygulanan model Şekil 4’te görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre BFVH’nin anot biyofilm direnci ( $R_{bio}$ ), yük transfer direnci ( $R_c$ ) ve solüsyon direncinin ( $R_s$ ) sırasıyla 0,74  $\Omega$ , 2,09  $\Omega$ , ve 3,53  $\Omega$  olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük biyofilm direncinin (0,74  $\Omega$ ) kalay oksit kaplı bakır mesh elektrotun yüksek elektriksel iletkenliğini ve alg hücresinden anot yüzeyine olan elektron transferinin kolay bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



**Şekil 4.** BFVH’de anot elektroduna ait Nyquist diyagramı (a) ve uygulanan model (b)

BFVH performansını gösteren bir diğer önemli parametre de CV analizidir. CV analizleri işletme süresi sonunda anot sıvısı ve elektrot yüzeyinde biyofilm mevcut iken yapılmıştır. CV analiz eğrisi Şekil 5’te verilmiştir. BFVH’ye yapılan CV analizinde akım yoğunluğunu gösteren anot piki 0,055 A/m<sup>2</sup>, katot piki ise -0,064 A/m<sup>2</sup>

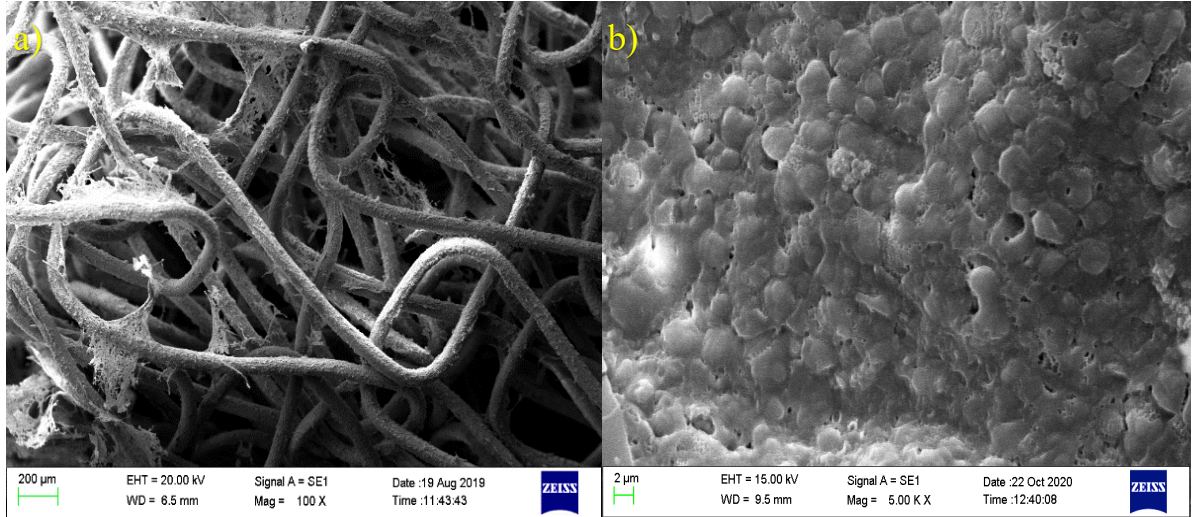
olarak tespit edilmiştir. Anot pikinin yüksek olması, *Chlorella vulgaris* türünün elektron transfer etkinliğinin yüksek olduğunu göstermekte ve bu sonuç elde edilen güç yoğunluğu sonucunu desteklemektedir.



Şekil 5. BFVH reaktörüne ait döngüsel voltametri (CV) eğrisi

### 3.3. SEM sonuçları

BFVH reaktörlerinde anot elektrot yüzeyindeki biyofilm yapısı, reaktörün performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Bu çalışmada BFVH reaktöründe kullanılan *Chlorella vulgaris* mikroalginin anot elektrot yüzeyinde oluşturduğu biyofilm yapısını incelemek üzere işletme süresi sonunda anot elektrotu yüzeyinde SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir. Elektrot yüzeyinden farklı noktalardan 100x büyütmede alınan SEM görüntülerinde kalın bir biyofilm tabakası gözlemlenmiştir (Şekil 6a). Daha yüksek büyütmelerde (5000x) alınan SEM görüntüsünde ise biyofilm yapısı daha detaylı bir şekilde görülmektedir. Şekil 6b'de *Chlorella vulgaris* mikroalginin ve hücre dışı polimerik maddelerin (çözünmüş mikrobiyal ürünler ve hücre dışı polimerik maddeler) yoğun bir şekilde mevcut olduğu görülmüştür. Bu durum, kullanılan anot elektrotunun mesh yapısında olmasının geniş bir spesifik yüzey alanı sağladığını ve böylece iyi bir biyofilm oluşmasında etkili olduğunu göstermiştir. Elde edilen SEM sonuçları, maksimum güç yoğunluğunun anot elektrotu yüzeyindeki biyofilm yapısı ile doğrudan ilişkili olduğunu desteklemektedir.



Şekil 6. Anot elektrot yüzeyinden alınan SEM görüntüsü

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada BFVH'de yeni bir elektrot kombinasyonu kullanılarak *Chlorella vulgaris* türü ile 142,28 mW/m<sup>2</sup> güç yoğunluğu elde edilmiştir. Bu değer literatürdeki benzer çalışmalarda üretilen güç değerleri ile kıyaslanabilir düzeydedir. BFVH'de elde edilen elektrokimyasal ve mikroskopik analiz sonuçları yeni elektrot kombinasyonunun *Chlorella vulgaris* türü ile uyumluluğunu ve yüksek güç yoğunluğu eldesini desteklemektedir. Anot elektrotunda BFVH uygulamaları için önemli olan biyofilm oluşumunu destekleyen kalın biyofilmin varlığı SEM gözlemleri ile tespit edilmiştir. Sonuç olarak kalay oksit kaplı bakır mesh (anot) ve platin kaplı titanyum mesh (katot) elektrot kombinasyonu, BFVH uygulamalarında daha yüksek güç yoğunlukları elde etmek için yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. BFVH'lerle ilgili gelecekteki çalışmalarda anot ve katot malzemelerinin iyileştirilmesi, matematiksel modellerin geliştirilmesi, tasarımın optimizasyonu ve çalışma koşulları üzerinde durulabilir. Nihai amaç, düşük maliyete sahip üstün performans ve uzun süreli işleme imkan veren BFVH'ler geliştirmektir.

**Teşekkür:** Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından desteklenmiş olan (Proje No: MF.18.62) "Biyofotovoltaik hücre ile elektrik üretimi" başlıklı yüksek lisans çalışmasının bir kısmını içermektedir. Katkılarından dolayı FÜBAP'a teşekkür ederiz. M.B. deneysel düzeneğin hazırlanması, analizlerin yapılması, sonuçların yorumlanması ve makalenin yazılmasına katkıda bulundu. E.T. fikir sahibi, deneysel düzeneğin hazırlanmasına ve makalenin yazılmasına katkıda bulundu.

#### Kaynaklar

- [1] Bradley RW, Bombelli P, Rowden SJ, Howe CJ. Biological photovoltaics: intra-and extra-cellular electron transport by cyanobacteria. *Biochem Soc T* 2012; 40: 1302-1307.
- [2] Gul MM, Ahmad KS. Bioelectrochemical systems: Sustainable bio-energy powerhouses. *Biosens Bioelectron* 2019; 142: 111576.
- [3] Schuergers N, Werlang C, Ajo-Franklin CM, Boghossian AA. A synthetic biology approach to engineering living photovoltaics. *Energ Environ Sci* 2017; 10: 1102-1115.
- [4] Inglesby AE, Yunus K, Fisher AC. In situ fluorescence and electrochemical monitoring of a photosynthetic microbial fuel cell. *Phys Chem Chem Phys* 2013; 15: 6903-6911.
- [5] Pisciotta JM, Zou Y, Baskakov IV. Light-dependent electrogenic activity of cyanobacteria. *PLoS one* 2010; 5: e10821.
- [6] Bombelli P, Bradley RW, Scott AM, Philips AJ, McCormick AJ, Cruz SM, Anderson A, Yunus K, Bendall DS, Cameron PJ. Quantitative analysis of the factors limiting solar power transduction by *Synechocystis* sp. PCC 6803 in biological photovoltaic devices. *Energ Environ Sci* 2011; 4: 4690-4698.
- [7] Bradley RW, Bombelli P, Lea-Smith DJ, Howe CJ. Terminal oxidase mutants of the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 show increased electrogenic activity in biological photo-voltaic systems. *Phys Chem Chem Phys* 2013; 15: 13611-13618.
- [8] Fu C-C, Hung T-C, Wu W-T, Wen T-C, Su C-H. Current and voltage responses in instant photosynthetic microbial cells with *Spirulina platensis*. *Biochem Eng J* 2010; 52: 175-180.
- [9] McCormick AJ, Bombelli P, Scott AM, Philips AJ, Smith AG, Fisher AC, Howe CJ. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system. *Energ Environ Sci* 2011; 4: 4699-4709.
- [10] Thorne RJ, Hu H, Schneider K, Cameron PJ. Trapping of redox-mediators at the surface of *Chlorella vulgaris* leads to error in measurements of cell reducing power. *Phys Chem Chem Phys* 2014; 16: 5810-5816.
- [11] Ho S-H, Chen C-Y, Chang J-S. Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO<sub>2</sub> fixation and lipid/carbohydrate production of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresource Technol* 2012; 113: 244-252.
- [12] Lee BD, Apel WA, Walton MR. Screening of cyanobacterial species for calcification. *Biotechnol Progr* 2004; 20: 1345-1351.
- [13] Fu C-C, Su C-H, Hung T-C, Hsieh C-H, Suryani D, Wu W-T. Effects of biomass weight and light intensity on the performance of photosynthetic microbial fuel cells with *Spirulina platensis*. *Bioresource Technol* 2009; 100: 4183-4186.
- [14] Darus L, Lu Y, Ledezma P, Keller J, Freguia S. Fully reversible current driven by a dual marine photosynthetic microbial community. *Bioresource Technol* 2015; 195: 248-253.
- [15] Cereda A, Hitchcock A, Symes MD, Cronin L, Bibby TS, Jones AK. A bioelectrochemical approach to characterize extracellular electron transfer by *Synechocystis* sp. PCC6803. *PLoS One* 2014; 9: e91484.
- [16] Huang L-F, Lin J-Y, Pan K-Y, Huang C-K, Chu Y-K. Overexpressing ferredoxins in *Chlamydomonas reinhardtii* increase starch and oil yields and enhance electric power production in a photo microbial fuel cell. *Int J Mol Sci* 2015; 16: 19308-19325.
- [17] Ng F-L, Jaafar MM, Phang S-M, Chan Z, Salleh NA, Azmi SZ, Yunus K, Fisher AC, Periasamy V. Reduced graphene oxide anodes for potential application in algae biophotovoltaic platforms. *Sci Rep* 2014; 4: 7562.
- [18] Laohavisit A, Anderson A, Bombelli P, Jacobs M, Howe CJ, Davies JM, Smith AG. Enhancing plasma membrane NADPH oxidase activity increases current output by diatoms in biophotovoltaic devices. *Algal Res* 2015; 12: 91-98.

- [19] Sekar N, Umasankar Y, Ramasamy RP. Photocurrent generation by immobilized cyanobacteria via direct electron transport in photo-bioelectrochemical cells. *Phys Chem Chem Phys* 2014; 16: 7862-7871.
- [20] Hasan K, Grippo V, Sperling E, Packer MA, Leech D, Gorton L. Evaluation of photocurrent generation from different photosynthetic organisms. *ChemElectroChem* 2017; 4: 412-417.
- [21] Ochiai H, Shibata H, Sawa Y, Shoga M, Ohta S. Properties of semiconductor electrodes coated with living films of cyanobacteria. *Appl Biochem Biotech* 1983; 8: 289-303.
- [22] Thorne R, Hu H, Schneider K, Bombelli P, Fisher A, Peter LM, Dent A, Cameron PJ. Porous ceramic anode materials for photo-microbial fuel cells. *J Mater Chem* 2011; 21: 18055-18060.
- [23] Saar KL, Bombelli P, Lea-Smith DJ, Call T, Aro E-M, Müller T, Howe CJ, Knowles TP. Enhancing power density of biophotovoltaics by decoupling storage and power delivery. *Nat Energy* 2018; 3: 75-81.
- [24] Liu L, Choi S. Self-sustainable, high-power-density bio-solar cells for lab-on-a-chip applications. *Lab on a Chip* 2017; 17: 3817-3825.
- [25] Watanabe K. Recent developments in microbial fuel cell technologies for sustainable bioenergy. *J Biosci Bioeng* 2008; 106: 528-536.
- [26] Satyanarayana K, Mariano A, Vargas J. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. *Int J Energ Res* 2011; 35: 291-311.
- [27] De Caprariis B, De Filippis P, Di Battista A, Di L, Palma MS. Exoelectrogenic activity of a green microalgae, *Chlorella vulgaris*, in a bio-photovoltaic cells (BPVs). *Chem Engineer Trans* 2014; 38.
- [28] Muñoz R, Jacinto M, Guieysse B, Mattiasson B. Combined carbon and nitrogen removal from acetonitrile using algal-bacterial bioreactors. *Appl Microbiol Biot* 2005; 67: 699-707.
- [29] Daneshvar E, Antikainen L, Koutra E, Kornaros M, Bhatnagar A. Investigation on the feasibility of *Chlorella vulgaris* cultivation in a mixture of pulp and aquaculture effluents: treatment of wastewater and lipid extraction. *Bioresource Technol* 2018; 255: 104-110.
- [30] Taşkan E, Bulak S, Taşkan B, Şaşmaz M, El Abed S, El Abed A. Nitinol as a suitable anode material for electricity generation in microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry* 2019; 128: 118-125.
- [31] Chen S, Jing X, Tang J, Fang Y, Zhou S. Quorum sensing signals enhance the electrochemical activity and energy recovery of mixed-culture electroactive biofilms. *Biosens Bioelectron* 2017; 97: 369-376.
- [32] Senthilkumar N, Sheet S, Sathishkumar Y, Lee YS, Phang S-M, Periasamy V. Titania/reduced graphene oxide composite nanofibers for the direct extraction of photosynthetic electrons from microalgae for biophotovoltaic cell applications. *Appl Phys A* 2018; 124: 769.
- [33] Karthikeyan C, Raj Kumar T, Pannipara M, Al-Sehemi AG, Senthilkumar N, Angelaalincy M, Varalakshmi P, Phang SM, Periasamy V, Gnana kumar G. Ruthenium oxide/tungsten oxide composite nanofibers as anode catalysts for the green energy generation of *Chlorella vulgaris* mediated biophotovoltaic cells. *Environ Prog Sustain* 2019; 38: e13262.
- [34] Bombelli P, Müller T, Herling TW, Howe CJ, Knowles TP. A high power-density, mediator-free, microfluidic biophotovoltaic device for cyanobacterial cells. *Adv Energy Mater* 2015; 5: 1401299.
- [35] Lin C-C, Wei C-H, Chen C-I, Shieh C-J, Liu Y-C. Characteristics of the photosynthesis microbial fuel cell with a *Spirulina platensis* biofilm. *Bioresource Technol* 2013; 135: 640-643.
- [36] Bombelli P, Zarrouati M, Thorne RJ, Schneider K, Rowden SJ, Ali A, Yunus K, Cameron PJ, Fisher AC, Wilson DI. Surface morphology and surface energy of anode materials influence power outputs in a multi-channel mediatorless biophotovoltaic (BPV) system. *Phys Chem Chem Phys* 2012; 14: 12221-12229.
- [37] Luimstra VM, Kennedy S-J, Güttler J, Wood SA, Williams DE, Packer MA. A cost-effective microbial fuel cell to detect and select for photosynthetic electrogenic activity in algae and cyanobacteria. *J Appl Phycol* 2014; 26: 15-23.
- [38] Lan JC-W, Raman K, Huang C-M, Chang C-M. The impact of monochromatic blue and red LED light upon performance of photo microbial fuel cells (PMFCs) using *Chlamydomonas reinhardtii* transformation F5 as biocatalyst. *Biochem Eng J* 2013; 78: 39-43.



## Tek Kristal Formdaki $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ Süperiletken Sistemine In (% 5' e kadar) Katkısının Yapısal ve Elektriksel İletim Özelliklerine Etkisi

Kübra YAKINCI\*

<sup>1</sup> Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay/İskenderun, Türkiye

\*<sup>1</sup> [kubra.yakinci@iste.edu.tr](mailto:kubra.yakinci@iste.edu.tr)

(Geliş/Received: 17/06/2020;

Kabul/Accepted: 09/12/2020)

**Öz:** Bu çalışmada, Self-flux metodu ile tek kristal formda üretilen ve %5' e kadar In katkılanmış  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sisteminin ( $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5$ ) yapısal ve elektriksel iletim özelliklerini incelenmiştir.  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemi içerisinde oldukça düşük erime sıcaklığına sahip olan İndiyum'un kristal oluşumunda bir akı görevi gördüğü ve aynı zamanda yapıda homojen bir dağılım sergilediği bulunmuştur. Ancak In katkılama oranı arttıkça  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sisteminin süperiletkenlik özelliklerinin olumsuz yönde değiştiği görülmüştür. Katkılama oranlarına göre en iyi değerin,  $T_c^{\text{başlangıç}}$  ve  $T_c^{\text{sıfır}}$  değerleri, %1 In katkılı örnekte 16.07 K ve 14.80 K olarak bulunmuştur. Daha yüksek In katkı oranları için ise her iki değerinde azalma eğilimine girdiği bulunmuştur. Werthamer-Halfand-Hohenberg (WHH) eşitliği ile manyetodirenç eğrilerinden üst kritik alan değerleri hesaplanmış ve en iyi değerin %1 In katkısı için olduğu bulunmuş, yüksek katkılama oranları için de değerin azaldığı gözlenmiştir. Arrhenius eşitliği ile belirlenen, vorteks oluşum ve hareketlilik aktivasyon enerjisi 0 Teslada %1, %3 ve %5 In katkılı örnekler için 1822, 515, 457 eV' olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemine In katkısının artan oranlarının süperiletkenlik mekanizmasını olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Fe-tabanlı süperiletkenler, self-flux metodu, aktivasyon enerjisi.

### Effect of In (up to 5%) addition on Electrical Transport Properties of $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$ Superconductor System in Single Crystal Form

**Abstract:** In this study, structural and electrical transport properties of  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  system ( $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5$ ) fabricated in single crystal form by Self-flux method. Indium, which has a very low melting temperature within the  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  system, has been found to act as a flux in crystal formation and exhibits a homogeneous distribution in the structure. However, as the In addition rate increased, the superconducting properties of the  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  system changed negatively. According to the addition rates, the best value,  $T_c^{\text{onset}}$  and  $T_c^{\text{zero}}$  values were found as 16.07 K and 14.80 K for sample with 1% In addition. For higher In addition rates, it was found that both values tended to decrease. Upper critical field values were calculated from magnetoresistance curves by Werthamer-Halfand-Hohenberg (WHH) equation and it was found that the best value was for the addition of 1% In, and it was observed that the value decreased for high addition rates. The vortex formation and mobility activation energy determined by Arrhenius equation was found to be 1822, 515, 457 eV for samples with 1%, 3% and 5% In addition at zero Tesla. The obtained results showed that increasing rates of In addition to  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  system negatively affect the superconducting mechanism.

**Key words:** Fe-based superconductors, self-flux method, activation energy.

#### 1. Giriş

Fe-tabanlı süperiletkenlerde elektron katkılanması sonucu yüksek simetriden tetragonal fazın antiferromanyetik spin düzenini dengelemesi ve düşük simetriden faza kristal dönüşümünü baskılamasıyla süperiletken duruma geçebildikleri 2008 yılında H. Hosono tarafından bulunmuştur [1]. Sonraki yıllarda ise yapılan çalışmalarda Fe-tabanlı süperiletken sistemlerin farklı fazları ortaya çıkarılarak kendi aralarında gruplandırılmıştır. Bu gruplar, 1111-fazı olarak bilinen ZrCuSiAs-tipi LnFeAsO (Ln; nadir toprak elementleri), 122-fazı olarak bilinen ThCr<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>-tipi AeFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> (Ae; toprak alkali elementler), 111-fazı olarak bilinen Fe<sub>2</sub>As-tipi AFeAs (A; Li veya Na) ve 11-fazı olarak bilinen anti-PbO-tipi Fe(Se,Te) şeklinde sıralanmaktadır. Fe-tabanlı süperiletkenlerin 1111, 122 ve 111-fazları Fe-pniktojen olarak bilinen ve FeAs tabakalarını içeren sistemlerdir. Fe-pniktojen süperiletkenlerde, alkali, toprak alkali veya nadir toprak elementleri ve oksijen-flor elementlerini içeren bloklanmış tabakalar ile Fe-As iletim tabakaları birbirleri ardına dizilir. FeAs tabakalarını içeren Fe-pniktojen sistemlerin aksine ilk keşfedilen Fe-kalkojenit FeSe sistemi sadece Fe<sub>2</sub>Se<sub>2</sub> tabakalarından oluşur. Bloklanmış tabakaların olmayışından dolayı Fe-

\* Sorumlu Yazar: [kubra.yakinci@iste.edu.tr](mailto:kubra.yakinci@iste.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-1257-1532



kalkojenit sistemler, Fe-tabanlı yapılar içerisinde daha basit kristal yapıya sahiptirler ve bu durum araştırmacılar tarafından özel bir ilgi görmelerine neden olmuştur. Ayrıca toksik özellikte olmamaları da bir avantaj olarak görülmüş ve alaşım sistemlerde süperiletkenlik mekanizmasının aydınlatılabilmesi için iyi bir prototip olduğu bilim insanları tarafından kabul edilmiştir [2].

Diğer metal alaşımlar ile kıyaslandığında yüksek süperiletkenlik geçiş sıcaklığına sahip olan Fe-tabanlı süperiletkenlerin 1111- ve 122-fazlarının ana bileşikleri yük taşıyıcılarının katkılanmasıyla süperiletkenlik özelliği göstermektedir. Buna karşılık 11-fazı ana bileşiği olan FeSe herhangi bir yük taşıyıcı katkılanması olmaksızın 8 K' de süperiletken faza geçebilmektedir [3,4]. Bununla birlikte 11-fazındaki süperiletkenlik mekanizması sitokiyometrik değişime [5] ve dış basınç uygulamalarına da oldukça duyarlıdır [6-8]. Sitokiyometrik formdaki FeSe süperiletken olmayıp, %1 Fe fazlalığı ile bir süperiletkene dönüşürken, %3 oranında aşırı Fe katkılanmasıyla süperiletkenlik tamamen baskılanmaktadır [5]. Maksimum kritik sıcaklık ise,  $T_c$ ,  $\text{Fe}_{1.01}\text{Se}$  bileşiğinde 7 GPa dış basınç uygulanmasıyla 37 K' de bulunmuştur [6].  $T_c$ ' deki bu artış  $\text{Fe}_2\text{Se}_2$  düzlemleri arasındaki boşluğun çöküşünden dolayı örgü hacmindeki azalmayla ilişkilidir. Benzer durum kimyasal basınç olarak ifade edilen sisteme katkılama yapılması veya uygun atomik yarıçapa sahip elementlerin yer değiştirmesiyle de olabilmektedir. Bu konudaki ilk çalışmalar, Wu ve arkadaşları tarafından  $\text{Fe}_{1+x}\text{Se}$  sisteminde Fe fazlalığı yerine çeşitli elementlerin (Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, In, Ba and Sm,  $x \geq 10\%$ ) yer değiştirmesinin etkisini araştırmaları ile başlamıştır. Ancak hiç bir element  $T_c$ ' yi ciddi oranda artırmaya yardımcı olmamıştır [9]. Sadece FeSe' de Se konumlarında S veya Te' ün yer değiştirmesiyle  $T_c$ ' nin artırılabilceği bulunmuştur [10]. Bu bağlamda, Se ile Te' ün %50 oranında yer değiştirmesiyle FeSe' un kritik sıcaklığı 14.5 K olarak elde edilmiştir [11-14]. FeSeTe aynı zamanda Fe-kalkojenit ailesinin diğer bir önemli üyesi olarak kabul edilmektedir. Gerçekte FeTe 70 K' de örgü distorsiyonu ile ilişkili bir antiferromanyetik düzen sergiler ve aynı zamanda FeTe tabakaları arasındaki bölgede %7-25 Fe fazlalığı bulunmaktadır. Te' ün Se ile kısmi olarak yer değiştirmesi sonucu düşük sıcaklık yapısal ve manyetik faz geçişi baskılanarak Fe fazlalığı azalır. Böylece, süperiletkenlik ortaya çıkar. Bu keşif üzerine birçok araştırma grubu kimyasal basınçlı  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  sisteminin süperiletkenlik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu araştırmalar kapsamında da ilk olarak Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sn ve Cr elementlerinin  $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$  sistemine eklenmesinin süperiletkenlik geçiş sıcaklığına etkilerini incelemişlerdir [9-11]. Ni ve Co katkısının  $T_c$ ' de bir düşüşe neden olurken Mn ve Co katkısının  $T_c$ ' de bir baskılamaya veya çok hafif bir artışa neden olduğunu bulmuşlardır [15]. Bir başka araştırmada  $\text{Fe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Te}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sisteminde Fe konumlarına  $x=0.05$  oranında Mn elementinin yer değiştirmesinin süperiletkenlik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği özellikle de kritik akım yoğunluğu değerinde önemli bir artış gösterdiği kanıtlanmıştır [16]. Kendi laboratuvarımızda yapmış olduğumuz araştırmalarda  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemine Cu elementinin katkısının süperiletkenlik özelliklerini tamamen bozduğu kanıtlanmıştır [17]. Chen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemine % 5 oranında Sn katkılanması yapıldığında süperiletkenlik geçiş sıcaklığında önemli bir değişiklik olmazken mikroyapı ve homojenitenin iyileştiği ve kritik akım özelliklerinde bir miktar artış olduğu bulunmuştur [18].

Kimyasal katkılanmaların genellikle yapı içerisindeki zararlı safsızlıkların miktarını azaltarak süperiletken fazın kristalleşmesini kolaylaştırdığını ve aynı zamanda süperiletkenlik özelliklerinin iyileşmesinde de etkili olduğunu söyleyebiliriz. Bu çalışmada, tek kristal formdaki  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  süperiletken sistemine In elementi %1, %3 ve %5 oranlarında katkılanmıştır. Amacımız, yapılan katkılanmanın  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  süperiletken sisteminin yapısal ve elektriksel iletim özelliklerine etkisini incelenmektir. Sonuç olarak, üretilen örneklerin üst kritik alan, koherens uzunluk ve aktivasyon enerjisi hesaplamaları yaparak mevcut literatür ile karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Tek kristal formda In katkılanmış  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  süperiletken sistemi Self-flux metodu ile üretilmiştir. İyonik difüzyonun ön planda olduğu self-flux metodu ile malzemelerin yüksek sıcaklıkta eritilerek homojen dağılımları, sonra da çok yavaş soğutulularak tek kristal oluşumu sağlanır. Bu bağlamda self-flux metodu ile örnek hazırlarken kullanılan malzemelerin faz diyagramları yardımıyla termodinamik özellikleri tespit edilip ısı işlem prosedürünün belirlenmesi önem taşımaktadır. Fe-kalkojenit sistemlerin tek kristal formda üretimlerinde self-flux metodu sıklıkla tercih edilmektedir.

Başlangıç materyalleri olarak ~10  $\mu\text{m}$  tanecik boyutunda Fe tozu (%99.999), 0.5-1 mm boyutunda Te tanecikleri (%99.999) ve Se tanecikleri (%99.999) ile In tozu (%99.999) kullanılmış ve  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemine %1-%3 ve %5 oranlarında In katkısı yapılmıştır. Belirlenen kompozisyonlar için başlangıç malzemeleri sitokiyometrik oranlarında tartılarak iç çapı 6.0 mm ve dış çapı 9.0 mm olan kuartz tüp içerisine konulmuş ve vakum altında kuartz tüp kapatılmıştır. Ancak, Se ve Te' ün yüksek buhar basıncından dolayı olası patlamaları önlemek amacıyla birinci kuartz tüp iç çapı 10.0 mm ve dış çapı 12.0 mm olan ikinci bir kuartz tüp içerisine yerleştirilerek vakumlandıktan sonra kapatılmıştır. Hazırlanan kuartz tüpler fırın içerisine dik bir şekilde yerleştirilerek ısı işlem

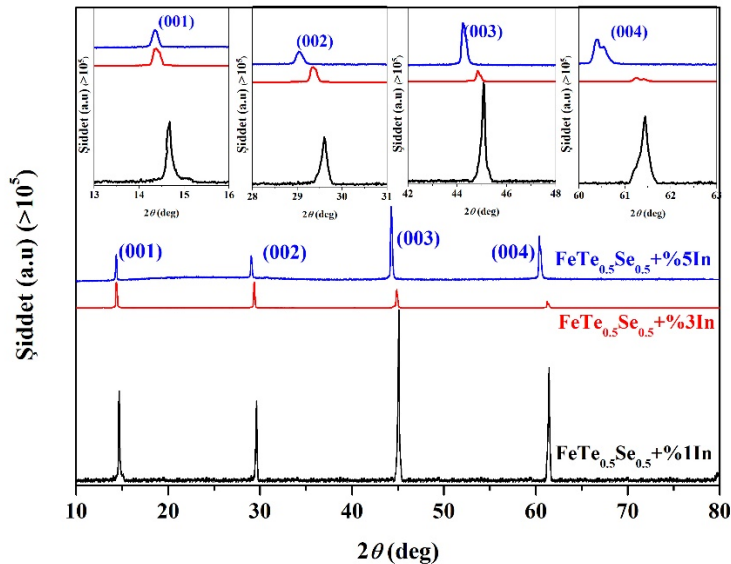
uygulanmıştır. Kuartz tüp içerisindeki malzemeler yüksek sıcaklıkta (1100 °C) ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 20 saat beklenmiştir. Daha sonra 650 °C' ye 150 saatte düşülmüş sonra da kuartz tüpler fırından çıkarılarak suda ani soğutulmaları (quench) sağlanmıştır. Bu işlem sonrasında parlak yüzeylere sahip ve kolayca birbirlerinden ayrılabilen kristal tabakalar elde edilmiştir.

Elde edilen tek kristal örneklerin yapısal karakteristikleri X-Işını Kırınımı (XRD) analizi, Malvern Panalytical Empyrean X-Ray difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir. Tek kristal örneklerin yüzey morfolojilerini incelemek için SEM analizi ve stokiyometrisini belirlemek için EDS analizi, UltraDry EDS Detektör ve Quasor II EBSD ile donatılmış Thermo Scientific-FEI Apreo S SEM cihazı kullanılmıştır. AFM analizi ezAFM ile dynamic modda PPP-MFM tipi cantilever kullanılarak 256x256 çözünürlükte ve 1.2-2 V<sub>RMS</sub> salınım genliklerinde ve oda sıcaklığında incelemeleri yapılmıştır. Elektriksel transport özellikleri "Quantum Dizayn Fiziksel Özellik Ölçüm Sistemi (PPMS-9T)" ile belirlenmiştir.

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

#### 3.1. Yapısal Analiz

Şekil 1, FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%1 In, FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%3 In, FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%5 In kompozisyonlarına ait XRD desenlerini göstermektedir. Elde edilen tüm tek kristal örnekler için beklenildiği gibi (00 $\ell$ ) pikleri baskın olup (001), (002), (003) ve (004) düzlemlerine ait pikler gözlenmiştir. In atomundan kaynaklı herhangi bir safsızlık pikine rastlanmamıştır ki bu durum In atomlarının FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> örgüsü içerisine homojen bir şekilde dâhil olduğunun bir kanıtıdır. Bununla birlikte, grafiğin üst kısmında her düzleme ( (001), (002), (003), (004) ) ait piklerdeki kayma da net bir şekilde görülmektedir. FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> sistemi ele alındığında süperiletkenlik özellikleri %3' e kadar Fe fazlalığı olması ve Se ile Te' ün kısmi olarak yer değiştirmesiyle en iyi şekilde elde edilmektedir. FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> sistemindeki element atomlarının iyonik yarıçapları Fe=0.55 Å, Se=0.50Å ve Te=0.97Å iken yapı içerisine dâhil edilen indium' un iyonik yarıçapı 0.80Å' dur. Sistemde Fe fazlalığı oluşturmak yerine bir başka element atomunun yapı içerisine eklenmesi durumunu incelediğimiz bu çalışmada indium' un iyonik yarıçapı Fe' den daha yüksek olup artan oranlarda yapıya eklenmesi piklerde belirgin bir kaymaya neden olmakta ve bu da Tablo-1' de verilen örgü parametrelerinde ve kristal hacmindeki değişime yansımaktadır [2]. Üretilen tüm örneklerin P4/nmm uzay grubunda ve tetragonal kristal simetrisine sahip olduğu bulunmuştur. Kristal parametrelerindeki değişim ve elektriksel ölçüm sonuçları ile yapılan hesaplamalar dikkate alındığında; In atomunun FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> sistemine ilavesinin iyonik olarak uyum sağlandığı ancak katkılama miktarının artmasıyla süperiletkenlik parametrelerinde düşüşe neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 1. FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%1 In, FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%3 In ve FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%5 In örneklerine ait XRD desenleri (sol üst köşedeki grafikte (003) düzlemine ait piklerdeki kayma gösterilmiştir.

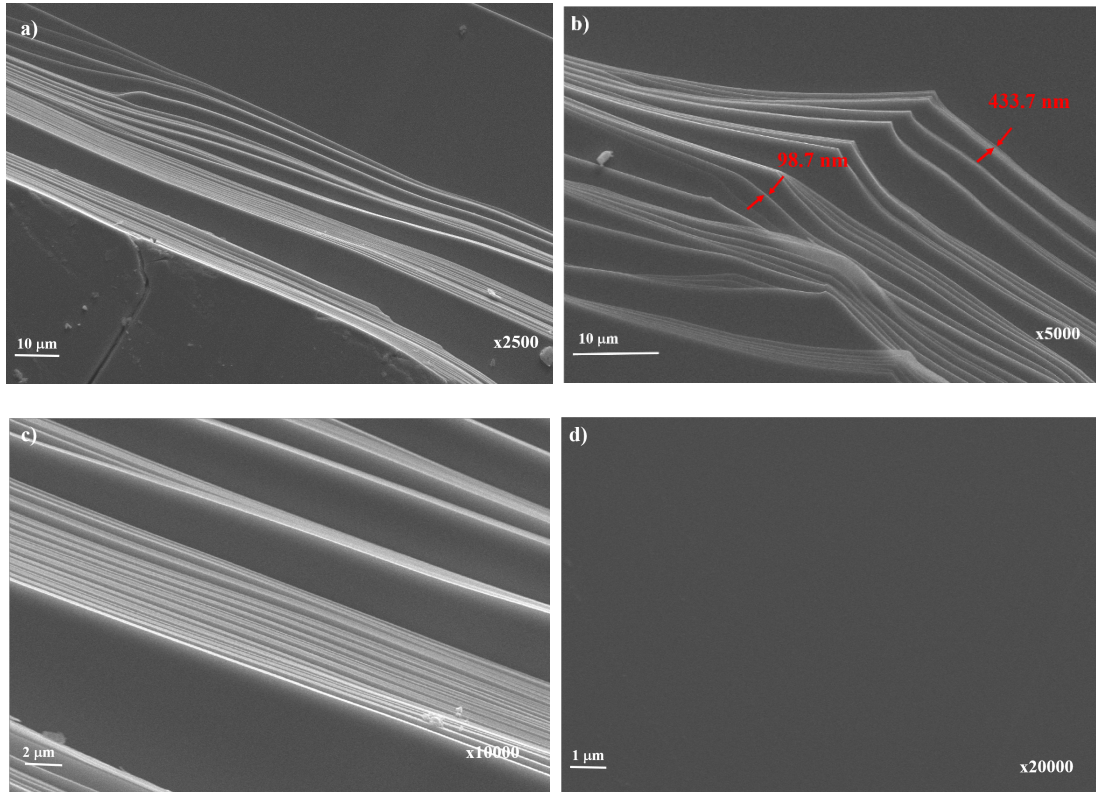
Tablo 1. %1, %3 ve %5 In katkılı FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> sistemine ait kristalografik bulgular.

Örnek	<i>a</i> -örgü parametresi (Å)	<i>c</i> -örgü parametresi (Å)	Kristal Hacmi (Å <sup>3</sup> )	Kristal Yapı	Uzay grubu
$\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1\text{In}$	3.8046	6.2208	90.05	Tetragonal	P4/nmm
$\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3\text{In}$	3.7941	6.2187	89.52	Tetragonal	P4/nmm
$\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5\text{In}$	3.7703	6.2041	88.19	Tetragonal	P4/nmm

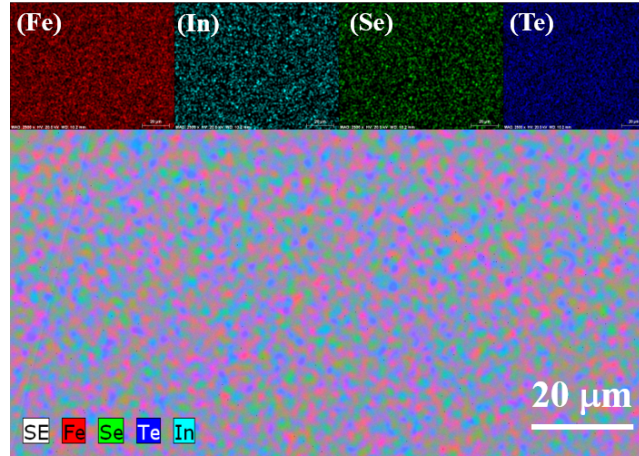
### 3.2. Morfolojik Analizler (SEM ve EDX analizleri)

Şekil 2' de self-flux yöntemiyle büyütülen  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1\text{In}$  tek kristal sistemine ait sırasıyla 2500, 5000, 10000 ve 20000 büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri görülmektedir. Elde edilen tüm tek kristal örnekler benzer morfolojiye sahip olmakla birlikte SEM görüntülerinden anlaşılacağı gibi, parlak siyah yüzeylere ve herhangi bir deformasyon oluşturmadan ana matristen kolayca ayrılabilen tabakalı bir yapıya sahiptirler. Şekil 2b' de gösterildiği gibi tabakaların kalınlığı 100 ile 450 nm arasında değişmektedir. Tek kristal yüzeylerde herhangi bir safsızlık da bulunmamıştır.

Aynı zamanda Şekil 3' de verilen  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1\text{In}$  tek kristal sistemine ait EDX nokta haritalandırma incelemelerine göre In element ilavesi  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemi üzerinde fiziksel olarak herhangi bir morfolojik farklılığa neden olmamıştır. Homojen bir dağılım sergilemiş ve yer yer kümeleşmeler ya da farklı bir safsızlık fazı oluşumu görülmemiştir. Bu da aslında farklı erime sıcaklıklarına sahip elementler (FeSeTe) için In katkılanmasının iyi bir flux görevi gördüğü ve iyi bir eriyik oluşturduğunu ortaya çıkarmıştır [24].



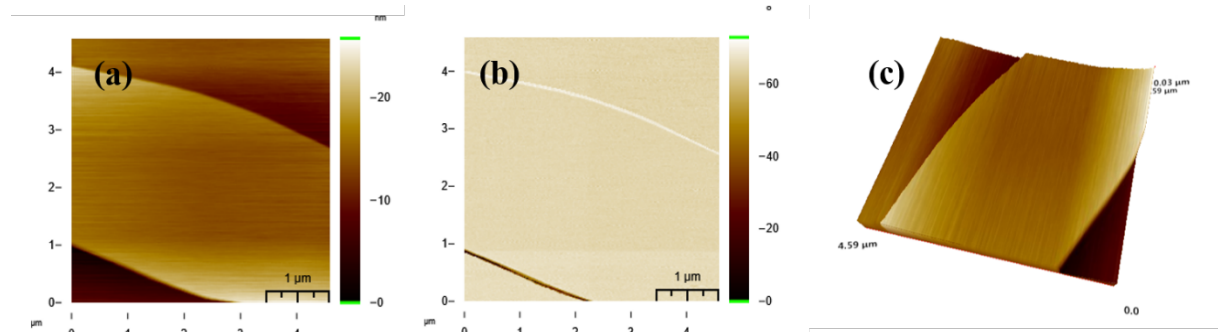
Şekil 2. Self-flux yöntemiyle üretilen  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1\text{In}$  katkılı örneğe ait sırasıyla a) 2500, b) 5000, c) 10000 ve d) 20000 büyütmede yüzeyin SEM görüntüleri.



**Şekil 3.** Self-flux yöntemiyle üretilen  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1$  In katkılı örneğe EDX nokta haritalandırma 1) Fe, 2) In 3)Se, 4) Te ile genel görüntü.

### 3.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) İncelemeleri

Tek kristal formda ürettiğimiz %5' e kadar In katkılı  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  örnekleri katmanlı bir yapı sergilemekte olduğu ve ince uçlu bir neşter yardımıyla ince tabakalara kolayca ayrılabilirdiği gözlenmiştir. Yüzey özelliklerini daha net gözlemleyebilmek amacıyla atomik kuvvet mikroskobunun MFM (Manyetik Kuvvet Mikroskobu) modunda yüzey resimleri alınmıştır. Şekil 4a'da tabakalı örneğin yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi çok net bir formda pürüzsüz ve kusursuz (yapısal olarak) bir yüzeye sahip oldukları görülmüştür. Benzer şekilde yüzeyde her hangi bir safsızlık fazının olmadığı da açıkça görülmüştür, Şekil 4 b. Benzer şekilde yüzeydeki safsızlık durumu üç boyutlu olarak da elde edilmiştir, Şekil 4c.



**Şekil 4.** Tek kristal formdaki  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1$  In örneğine ait Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntüleri, a) topoloji, b) faz, c) 3-boyutta görüntü.

### 3.4. Elektriksel İletim Özellikleri

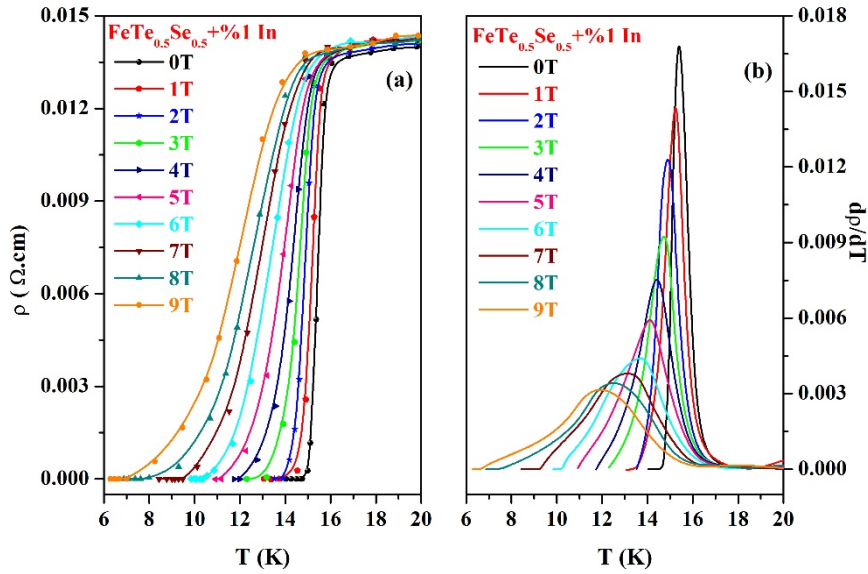
Şekil 5a, c ve e'de 9T' ya kadar manyetik alan altında ve 20-4.2 K aralığında sırasıyla  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1$  In,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3$  In ve  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5$  In sistemleri için öz direncin sıcaklığa bağlı değişimini ( $M\rho-T$ ), Şekil 5b,d,f'de ise öz direnç eğrilerinin diferansiyel formu olan  $d\rho/dT-T$  eğrileri gösterilmiştir. Bu eğrilerden faydalanılarak elde edilen süperiletkenlik parametreleri Tablo 2' de özetlenmektedir. Buna göre, katkılama miktarının artmasıyla süperiletkenlik özelliğinin giderek zayıfladığı net bir şekilde görülmektedir. Bu durum, aslında yapı içerisinde oluşan iletim yollarının katkı miktarının artırılması ile birlikte deforme olmaya başladığını ortaya çıkarmaktadır. Oda sıcaklığından süperiletkenlik geçiş sıcaklığına kadar örnekler metalik bir davranış sergilemiş ve herhangi bir anomali ya da yarıiletken tipi gibi davranış göstermemiştir. Şekil 5b' de ana pikten önce küçük bir pik karşımıza çıkmaktadır. Bu özellikle atomik boyuttaki safsızlıklardan kaynaklanmakta ve alan değeri arttıkça da genişleme eğilimi göstermektedir. Benzer durum Şekil 5f' de görülmekte ve ana pikten sonra ortaya

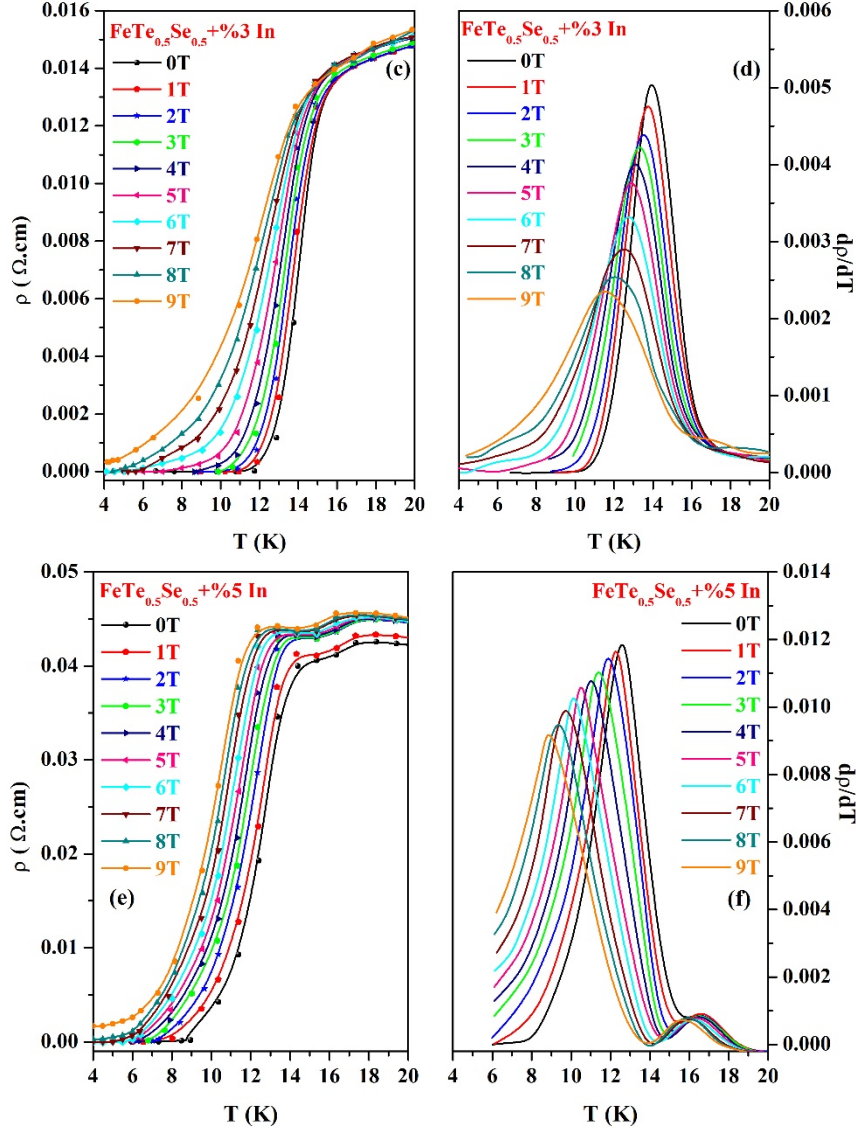
çıkılmaktadır.  $T_c^{\text{başlangıç}}$  noktasında %1 In katkılı örnek keskin bir düşüş sergilerken %3 ve %5 In katkılı örneklerde  $\Delta T = T_c^{\text{başlangıç}} - T_c^{\text{sıfır}}$  aralığı genişlemektedir. Bununla birlikte artan manyetik alanla birlikte kritik sıcaklık değerlerinde daha düşük sıcaklıklara doğru hafif bir kayma ortaya çıkmaktadır ki bu beklenen bir durumdur. Çünkü uygulanan manyetik alandaki artış zıt yönlü spinleri aynı yönelime getirmeye zorlayarak Cooper çiftlerinde zayıflamaya neden olur ve bu durum elektron çiftleri popülasyonunda bir düşüşle sonuçlanır. Sonuçta,  $T_c$ ' yi düşürerek süperiletken duruma geçiş gecikir.

**Tablo 2.** %1, %3 ve %5 katkılı  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemine ait elektriksel ölçüm parametreleri

Sample	R-T		FWHM	$H_{c2}(0)$ (T)			$\xi_{ab}(0)$ (nm)			$U_0/k_B$ (eV)									
	$T_c^{\text{baş}}$	$T_c^{\text{sıfır}}$		10%	50%	90%	0T	1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T			
$\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1\text{In}$	16.07	14.80	0.77	54.51	45.27	28.01	2.45	2.69	3.43	1822	1153	1091	594	476	236	220	149	94	64
$\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3\text{In}$	15.77	11.74	2.71	46.07	42.72	25.34	2.67	2.77	3.60	515	327	234	187	153	118	95	72	53	41
$\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5\text{In}$	14.42	8.90	2.86	34.78	30.29	24.71	3.07	3.29	3.65	457	110	88	75	70	62	53	54	33	28

Üretilen örneklerin iletim özellikleri açısından kaliteleri Şekil 5b,d,f ile verilen  $d\rho/dT-T$  eğrilerinden hesaplanan FWHM verileri (Tablo 2) ile de kontrol edilmiştir. %1 In katkılı örnek için 0 ve 9 T manyetik alanlar altında belirlenen FWHM değerleri sırasıyla 0,77 K ve 3,96 K olup literatürde bulunan tek kristal formdaki  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemi için verilen değerler ile kıyaslanabilir ölçüdedir [19-22]. Ayrıca, %5 In katkılı örnek için belirlenen 0 ve 9 T manyetik alanlar altında FWHM değerleri ise 2,86 K ve 5,50 K olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla katkılama miktarındaki artışın elektriksel iletim özelliklerini olumsuz yönde etkilediği açıkça görülmüştür.





**Şekil 5.**  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1 \text{ In}$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3 \text{ In}$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5 \text{ In}$  katkılı örnekler için 9 T'ye kadar manyetik alan altında **a,c,e** ölçülen  $M\rho$ - $T$  eğrileri, **b,d,f** hesaplanan  $d\rho/dT$ - $T$  eğrileri.

$\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1 \text{ In}$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3 \text{ In}$ ,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5 \text{ In}$  örneklerinin üst kritik alan,  $H_{c2}(0)$ , değerleri  $\rho$ - $T$  eğrisinin % 10, % 50 ve % 90 kriterleri baz alınarak ve Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır. WHH eşitliği;

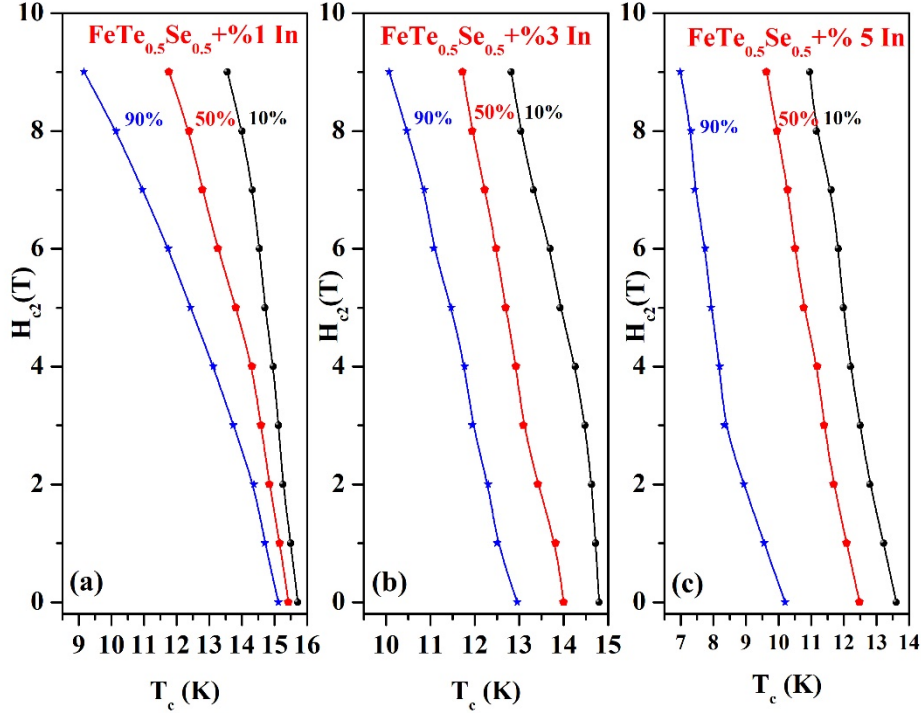
$$H_{c2}(0) = -0.693T_c \left( \frac{dH}{dT} \right)_{T=T_c} \quad (1)$$

ile verilmektedir [23]. Şekil 6 a,b ve c' de sırasıyla %1, %3 ve %5 In katkılı örnekler için  $H_{c2}(T)$ - $T$  grafikleri verilmektedir. Burada  $dH_{c2}/dT$ ,  $T=T_c$  noktasında  $H_{c2}(T)$ 'nin eğimidir. Eğim, %1 In, %3 In ve %5 In katkılı örnekler için sırasıyla  $-4.89 \text{ T/K}$ ,  $-4.2 \text{ T/K}$  ve  $-3.49 \text{ T/K}$  olarak bulunmuştur. Buna göre,  $H_{c2}(0)$  değerleri %1 In katkılı örnek literatürdeki tek kristal formda üretilen  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemine yakın iken (60-103 T arasında) %3 ve %5 In katkılı örneklerin  $H_{c2}(T)$  değerleri düşmektedir [24,25].

Üretilen örneklerin,  $\xi_c$ , uyum uzunlukları ise Ginzburg-Landau eşitliği ve özdirenç eğrisinde %90 kriteri baz alınarak hesaplanan  $H_{c2}(0)$  değeri kullanılarak hesaplanmıştır [26-28]. Ginzburg-Landau eşitliği;

$$\xi(0) = \left( \frac{\phi_0}{2\pi H_{c2}(0)} \right)^{1/2} \quad (2)$$

ile verilir. Burada  $\phi_0$ ; akı kuantası ( $\phi_0=2.07 \times 10^{-15}$  Wb) olarak alınır. [4]. Hesaplanan  $\xi_c(0)$  değerleri Tablo 2' de verilmektedir. Üst kritik alan,  $H_{c2}(0)$ , ile uyum uzunluğu,  $\xi_c(0)$ , arasında Ginzburg-Landau eşitliğinden de görüldüğü gibi ters bir orantı mevcuttur. Bu bağlamda, yüksek üst kritik alan,  $H_{c2}(0)$ , ile birlikte küçük uyum uzunluğu,  $\xi_c(0)$ , tek kristal formdaki FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> sistemi için tip-II süperiletkenliğin açık bir kanıtı olarak kabul edilmiştir.

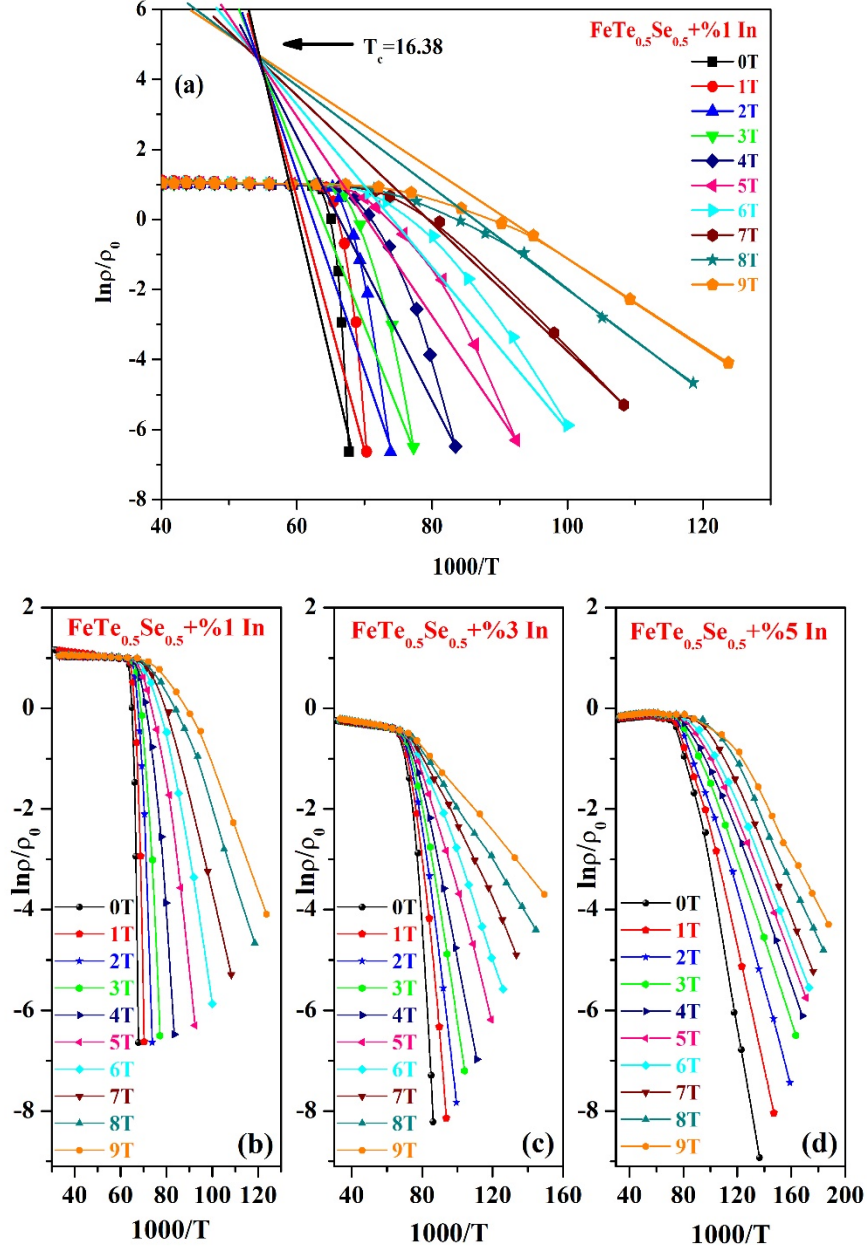


Şekil 6. a) FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%0 In, b) FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%3 In, c) FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%5 In örneklerine ait  $H_{c2}(T)$ - $T$  eğrileri.

Tek kristal formdaki FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> sisteminin farklı manyetik alanlar altındaki elektriksel özdireç değerleri aktivasyon enerjisini hesaplamak için TAFF (Thermally activated flux flow-Termal Aktivasyon Akı Akışı) modelini kullanarak daha detaylı incelenilmektedir. TAFF teorisine göre, artan manyetik alan ile elektriksel dirençteki genişleme, termal olarak desteklenen akı hareketi ile anlaşılmaktadır [29,30]. II. Tip süperiletkenler için TAFF, girdapların termal dalgalanmalarından kaynaklanabilmekte,  $\rho(T,H)$  eğrisinden artan manyetik alanla direnç geçişi genişliğin artmasıyla daha düşük sıcaklıklara doğru kaymaktadır. Demir bazlı süperiletkenlerin 1111-fazı, artan manyetik alanla YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> süperiletken sistemine benzer şekilde süperiletkenlik geçiş genişlemesi gösterirken 122-fazı bileşikleri düşük termal dalgalanmalardan dolayı ihmal edilebilir bir genişleme gösterir [31-33]. Şaşırtıcı şekilde FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub> sistemi artan manyetik alanla birlikte süperiletkenlik geçişinde ara değerde bir genişleme gösterir. TAFF bölgesindeki direnç, termal olarak aktive edilen girdapların sürüklenmesinden kaynaklanır. Böylece, akı sürüklenmesinin TAFF bölgesindeki direnci Arrhenius eşitliği ile verilir [31]. Arrhenius eşitliği ise;

$$\rho(H, T) = \rho_0 e^{-U_0/k_B T} \quad (3)$$

Burada,  $\rho_0$ , sıcaklıktan bağımsız sabit,  $k_B$ , Boltzmann sabiti,  $U_0$ , TAFF aktivasyon enerjisidir. Genel olarak,  $U_0$  manyetik alana zayıf bir şekilde bağlıdır. Örneğin; FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%0 In için  $\ln \rho - 1000/T$  eğrisine yerleştirilmiş TAFF Şekil 7a' da ve tüm örnekler için  $\ln \rho - 1000/T$  eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 7 b, c, d' de verilmiştir. Tüm çizgilerin kesişim noktası yaklaşık olarak  $T_c'$  yi vermekte olup FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%0 In için 16.38 K' dir.

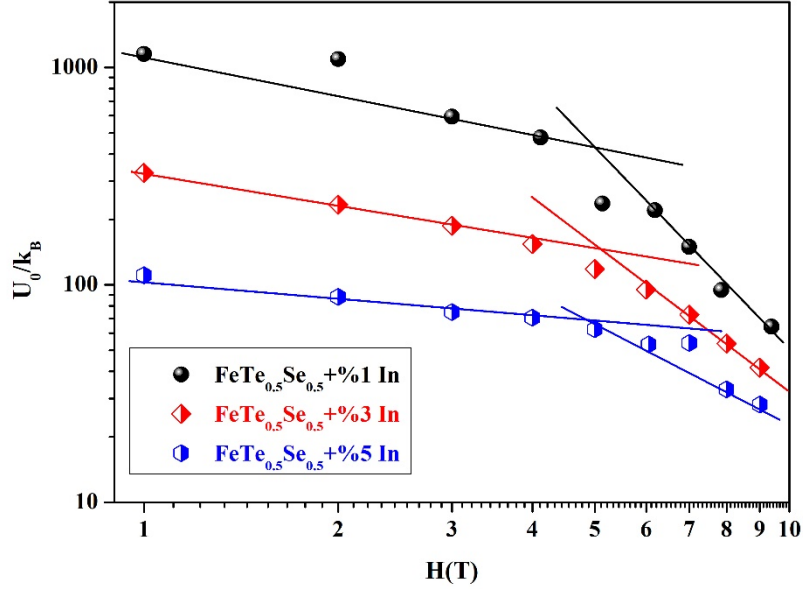


Şekil 7. a) FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%1 In örneği için  $\ln\rho/\rho_0$ - $1000/T$  eğrisi (kalın çizgilerin kesişim noktası  $T_c$ 'ye karşılık gelmektedir), b, c, d) FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%1 In, FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%3 In, FeTe<sub>0.5</sub>Se<sub>0.5</sub>+%5 In örneklerine ait  $\ln\rho/\rho_0$ - $1000/T$  eğrileri.

Şekil 8' de hesaplanan TAFF aktivasyon enerjisi grafiği verilmektedir ve ayrıca Tablo 2'de de sayısal olarak sunulmuştur. Burada, aktivasyon enerjisinin manyetik alanla  $U_0(H) \sim H^{-\alpha}$  zayıf güç yasasına uygun olarak ölçeklendirilebilmesi mümkündür. Burada  $\alpha$ , üs olup zayıf güç yasası içinde uygulanan her iki alan yönünde  $U_0$ 'daki düşüşü ifade eder. Yani, tek girdap sabitlenmesi baskın iken bunu toplu sabitlenme durumuna geçişle ilişkili olarak daha hızlı bir  $U_0$  düşüşünün izlediğini göstermektedir. Bununla birlikte,  $U_0$ 'ın manyetik alana bağlılığı düşük alanlarla yüksek alanlar arasında farklılık gösterir [25]. Bu bağlamda, %1 In katkılı örnekte düşük alan değerlerinde (0-4 T)  $\alpha=0.27$  ve yüksek alan değerlerinde (5-9 T)  $\alpha=0.35$ ' dir. %5 In katkılı örnek için ise,  $\alpha=0.78$  (0-4 T) ve  $\alpha=1.7$  (5-9 T) değerleri elde edilmiştir. Bu durum, 4 T' ya kadar düşük alanlarda, girdapların birbirinden bağımsız olarak güçlü bir şekilde sabitlenmesi ve uygulanan alana güçlü bir direnç göstermesi şeklinde ortaya çıkarken 4 T' dan sonra yüksek alan değerlerinde ise durum tamamen değişmektedir. Girdaplar arası etkileşim



mümkün olduğunca artar ve girdap hareketi aktivasyon enerjisi üzerinde bir baskı oluşturarak birlikte hareket etmesi sonucu  $U_0(H,T)$  düşmektedir. Bu düşüş, girdap hareketinden dolayı termal olarak aktif dağılıma şeklinde yorumlanmaktadır. Sonuç olarak,  $U_0(H,T)$ ' ın manyetik alana bağıllığı yüksek alanlarda güçlü duruma gelmektedir.



Şekil 8.  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%1$  In,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%3$  In,  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}+\%5$  In örneklerine ait  $U_0/k_B-T$  eğrileri.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Sonuç olarak, başarılı bir şekilde self-flux metodunu kullanarak tek kristal formda %1, %3 ve %5 oranlarında In katkılanmış  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemini elde ederek yapısal ve elektriksel özelliklerini inceledik. Fe-tabanlı süperiletkenlerin oldukça farklı kristal kimyasına sahip olmaları sebebiyle üretim tekniğinin seçimi önem taşımaktadır. Sistemin faz diyagramları incelenerek termodinamik özelliklerinin tespit edilmesi ve buna bağlı olarak ısıl işlem prosedürünün belirlenmesi üretim aşamasındaki en önemli faktördür. Bu bağlamda burada kullandığımız self-flux metodu tek kristal formdaki  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sisteminin elde edilmesinde en uygun tekniktir. Tek kristal örneklerimize ait XRD verilerinde sadece (001) düzlemlerine ait pikleri gözlemlenerek P4/nmm uzay grubunda ve tetragonal kristal simetrisine sahip olduğunu belirlenmiştir. Örgü parametreleri hesaplanmış ve katkı oranı ile birlikte belirgin bir azalmanın olduğu görülmüştür. Süperiletkenlik geçiş sıcaklıkları %1, %3 ve %5 In katkılı örnekler için sırasıyla, 16.07 K, 15.77 K ve 14.42 K olarak belirlenmiş ve katkı miktarının artmasıyla süperiletkenlik özelliklerindeki zayıflama FWHM değerleri belirlenerek doğrulanmıştır. Buna göre, %1 In katkılı örnek için 0 ve 9 T' daki FWHM değerleri sırasıyla 0.77 ve 3.96 K iken %5 In katkılı örnek için 2.86 ve 5.50 K değerleri elde edilmiştir. Werthamer-Helfand-Hohenberg (WHH) eşitliği yardımıyla üst kritik alan değerleri,  $H_{c2}(T)$ , hesaplanmış ve %1 In katkılı örnek için direnç eğrisinin % 10, % 50 ve % 90 kriterleri baz alınarak 54,51 T, 45.27 T ve 28.01 T olarak belirlenmiştir. %1, %3 ve %5 katkılı  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sisteminin uyum uzunluğu,  $\xi_c(0)$ , Ginzburg-Landau eşitliği ile belirlenmiştir. Elde edilen üst kritik alan,  $H_{c2}(T)$ , ve uyum uzunluğu,  $\xi_c(0)$ , değerleri %1 In katkılı örnek için tek kristal formdaki katkısız  $\text{FeTe}_{0.5}\text{Se}_{0.5}$  sistemi ile kıyaslanabilir ölçüdedir. Elde edilen örneklerin Aktivasyon enerjisi de hesaplanmıştır. Buna göre, aktivasyon enerjisi girdap sabitlemesinin baskın olduğu düşük alanlarda yüksek iken düşük alanlarda yüksek olduğu bulunmuştur. Genel olarak, In katkılanmasının elektriksel özelliklerde her hangi bir iyileştirme yapmadığı bulunmuştur.

#### Kaynaklar

- [1] Hsu FC, Luo JY, Yeh KW, vd. Superconductivity in the PbO-type structure  $\alpha$ -FeSe. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2008; 105, 14262.
- [2] Onar K, Fese-Tabanlı Yeni Nesil Süperiletken Alaşımların Tek Kristal Formda Üretimi, Karakterizasyonu ve Mühendislik Uygulamaları. Doktora, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- [3] Stewart, GR. Superconductivity in iron compounds. Rev. Mod. Phys, 2011; 83, 1589.

- [4] Shimizu, K., Kimura, T., Furomoto, S., Takeda, K., Kontani, K., Onuki, Y., Amaya, K. Superconductivity in the Non-Magnetic State of Iron Under Pressure. *Nature*, 2001; 412, 316.
- [5] McQueen TM, Huang Q, Ksenofontov V, vd. Extreme sensitivity of superconductivity to stoichiometry in Fe1+ $\delta$ Se. *Phys. Rev. B*. 2009; 79, 014522.
- [6] Medvedev S, McQueen TM, Troyan I., vd., Electronic and Magnetic Phase Diagram of beta-Fe(1.01)Se With Superconductivity at 36.7 K Under Pressure. *Nat. Mater.* 2009; 8, 630.
- [7] Margadonna S, Takabayashi Y, Ohishi Y, vd. Pressure evolution of the low-temperature crystal structure and bonding of the superconductor FeSe (Tc=37 K). *Phys. Rev. B*. 2009; 80, 064506.
- [8] Mizuguchi Y, Tomioka F, Tsuda S, Yamaguchi T, Takano Y. Superconductivity at 27K27K in tetragonal FeSe under high pressure. *Appl. Phys. Lett.* 2008; 93, 152505.
- [9] Wu MK, Hsu FC, Yeh KW, Huang TW, vd. The development of the superconducting PbO-type  $\beta$ -FeSe and related compounds. *Physica C*. 2009; 469, 340.
- [10] Mizuguchi Y, Tomioka F, Tsuda S, vd. Substitution Effects on FeSe Superconductor *J. Phys. Soc. Jpn.* 2009; 78, 074712.
- [11] Fang MH, Pham HM, Qian B, vd. Superconductivity close to magnetic instability in Fe(Se1-xTex)0.82. *Phys. Rev. B*. 2008; 78, 224503.
- [12] Yeh KW, Huang TW, Huang Y, vd. Tellurium substitution effect on superconductivity of the  $\alpha$ -phase iron selenide. *Europhys. Lett.* 2008;84, 37002.
- [13] Sales BC, Sefat AS, McGuire MA, vd. Bulk superconductivity at 14 K in single crystals of Fe1+yTexSe1-x. *Phys. Rev. B*. 2009; 79, 094521.
- [14] Taen T, Tsuchiya Y, Nakajima Y, Tamegai T. Superconductivity at Tc~14 K in single-crystalline FeTe0.61Se0.39. *Phys. Rev. B*. 2009; 80, 092502.
- [15] Kumar S and Singh PP. Excess of manganese in an iron-based superconductor: a first-principles study of its electronic, magnetic and superconducting properties. *Mater. Res. Express.* 2016; 3, 056001.
- [16] Ozabaci M, Yakinci K, Yakinci ME. Enhancement of Magnetic and Transport Properties of Superconducting Fe1-xMnxSe0.5Te0.5 Single Crystals. *JOM*. 2019;71,3285–3292.
- [17] Yakinci K, Ozabaci M, Depci T, Yakinci ME. Degradation of Superconducting Properties by Cu Adding on FeTe0.5Se0.5 System. *International Conference on Condensed Matter and Materials Science*; 2017; 11-15 October; Adana/ Turkey.112.
- [18] Chen N, Liu Y, Ma Z, Li H. Significant enhancement of superconducting properties in the FeSe0.5Te0.5 bulks by minor Sn addition. *Materials Letters*. 2016; 175,16–19.
- [19] Deguchi K, Takano Y, Mizuguchi Y. Physics and chemistry of layered chalcogenide superconductors. *Sci. Adv. Matter*. 2012; 13, 054303 (11pp).
- [20] Felner I, Nowik I, Tsindlekht MI, Ren Z, Shen X, Che G, Zhao Z, arXiv. 2008; 805, 2794.
- [21] Nowik I, Jerusalem IFHU, Awana VPS, Vajpayee A, Kishan H. *J. Phys. Condens. Matter*. 2008; 20, 292201.
- [22] Mukuda H, Terasaki N, Kinouchi H, Yashima M, Kitaoka Y, Suzuki S, Miyasaka S, Tajima S, Miyazawa K, Shirage P, Kito H, Eisaki H, Iyo A, Enhancement of Superconducting Transition Temperature Due to Antiferromagnetic Spin Fluctuations in Iron-pnictides LaFe(As1-xPx)(O1-yFy) : 31P-NMR Studies. *J. Phys. Soc. Jpn.* 2008; 77, 093704.
- [23] Awana VPS, Pal A, Vajpayee A, Mudgel M, Kishan H, Husain M, Zeng R, Yu S, Guo YF, Shi YG, Yamaura K, Takayama-Muromachi E. Synthesis and physical properties of FeSe1/2Te1/2FeSe1/2Te1/2 superconductor. *Appl. Phys.* 2010; 107, 09-128.
- [24] Onar K, Özçelik B, Güler NK, Okazaki H, Takeya H, Takano Y, Yakinci ME, Enhanced physical properties of single crystal Fe0.99Te0.63Se0.37 prepared by self-flux synthesis method. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016; 683, 164-170.
- [25] Maheshwari PK, Jha R, Gahtori B, and Awana VPS, Flux free growth of large FeSe1/2Te1/2 superconducting single crystals by an easy high temperature melt and slow cooling method. *AIP ADVANCES*. 2015; 5, 097112.
- [26] Zhang S.B, Sun YP, Zhu XD, Zhu XB, Wang BS, Li G, Lei HC, Luo X, Yang ZR, Song WH and Dai JM. Crystal growth and superconductivity of FeSex. *Supercond. Sci. Technol.* 2009; 22,015020.
- [27] Velasco Soto D, Rivera Gomez, FJ, Santillan Rodriguez CR, Saenz Hernandez RJ, Botello Zubiante, M.E., Matutes Aquino JA. Upper critical fields in a FeSe0.5Te0.5 superconducting single crystal. *J. Appl. Phys.* 2013; 113, 17-138.
- [28] Ding QP, Mohan S, Tsuchiya Y, Taen T, Nakajima Y, Tamegai T. Low-temperature synthesis of FeTe0.5Se0.5 polycrystals with a high transport critical current density. *Supercond. Sci. Technol.* 2011; 24, 075025.
- [29] Palstra TTM, Batlogg B, Schneemeyer LF, and Waszczak JV. Thermally Activated Dissipation in Bi2.2Sr2Ca0.8Cu2O8+ $\delta$ . *Phys. Rev. Lett.* 1988; 61, 1662.
- [30] Blatter G, Feigelman MV, Geshkenbein VB, Larkin AI, and Vinokur VM. Vortices in high-temperature superconductors. *Rev. Mod. Phys.* 1994; 66, 1125.
- [31] Jaroszynski J, Hunte F, Balicas L, Jo Y-J, Raicevic I, Gurevich A, Larbalestier DC, Balakirev FF, Fang L, Cheng P, Jia Y, and Wen HH. Upper critical fields and thermally-activated transport of NdFeAsO0.7F0.3 single crystal. *Phys. Rev. B*. 2008; 78, 174523.
- [32] Shahbazi M, Wang XL, Shekhar C, Srivastava ON, and. Dou SX. Supercond. Upper critical field, critical current density and thermally activated flux flow in fluorine doped CeFeAsO superconductors. *Sci. Technol.* 2010; 23, 105008.
- [33] Zhang YZ, Ren ZA, and Zhao Z X. Thermally activated energy and critical magnetic fields of SmFeAsO0.9F0.1. *Supercond. Sci. Technol.* 2009; 22, 065012.



## Sis Bilişim: Güvenlik Boyutları ve Güvenlik Analizi

Fatih TOPALOĞLU\*

Bilgisayar Mühendisliği Böl., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fak., Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye  
\*1 fatih.topaloglu@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 18/06/2020;

Kabul/Accepted: 01/01/2021)

**Öz:** Sis bilişim, bulut bilişimi ağların kenarına kadar genişleten bir paradigmadır. Sis bilişimin öne çıkan özelliği dağıtık ve son kullanıcılara yakın hizmetler sunmasıdır. Bu özellik, gizliliğin ve verilerin güvenliğinin korunması açısından çok önemlidir. Çünkü, sis bilişimin dağıtılmış mimarisi saldırı vektörlerinin sayısını arttırarak uç cihazların sahip olduğu verileri daha savunmasız hale getirir ve kötü amaçlı yazılım sızmalarına ve güvenlik açıklarına neden olur. Makale sis bilişim ortamındaki çeşitli güvenlik unsurlarının boyutlarını ve kapsamlı teknik analizini içermektedir. Bu çalışma iki nedenden dolayı ele alınmıştır. Birincisi, güvenlik, IoT sistemleri arasında belki de en büyük teknik kaygıdır, dolayısıyla özel bir çalışma olarak ele alınması gerekmektedir. İkincisi, çalışma son derece teknik ayrıntılar içerdiğinden güvenlik uzmanlarının en çok ilgi duyduğu bilgilerin bir kaynaktan toplanması amaçlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Sis bilişim, güvenlik boyutları, güvenlik analizi.

## Fog Computing: Security Dimensions and Security Analysis

**Abstract:** Fog computing is a paradigm that extends cloud computing to the edge of the networks. The prominent feature of fog computing is that it provides services that are messy and close to end users. This feature is very important to protect privacy and data security. Because, the distributed architecture of fog computing increases the number of attack vectors, making the data that end devices have more vulnerable and cause malware infiltration and vulnerabilities. The article includes the dimensions and comprehensive technical analysis of various security elements in the fog computing environment. This study is discussed for two reasons. First, security is perhaps the biggest technical concern among IoT systems, so it needs to be addressed as a special study. Secondly, since the study contains highly technical details, it is aimed to gather information that security experts are most interested in a source.

**Key words:** Fog computing, security dimensions, security analysis.

### 1. Giriş

Sis bilişim, milyarlarca bağlı cihaz için yeni uygulamalar ve hizmetler sunabilen, doğrudan ağı kenarında işlem gerçekleştirebilen bilgi işlem platformudur. [1]. Sis bilişimin karakteristik özellikleri ,bant genişliğinden tasarruf, hareketlilik desteği, düşük gecikme ve gerçek zamanlı etkileşimler, heterojen, coğrafi dağılım ve merkezi olmayan veri analitiği, veri güvenliği ve gizlilik koruması, düşük enerji tüketimi ve birlikte çalışabilirliktir.

Sis bilişim, IoT uygulama dağıtım platformları [2-9], sağlık hizmetleri [10-13], akıllı şehir uygulamaları [14-17], hızlı tepki ve düşük enerji harcama [18,19] alanlarında gelişmiş hizmet kalitesi sunabilir. Ayrıca, sis bilişimde işbirliğinin gerçekleştiği birçok alan vardır. Bu gizlilik ve güvenlikle ilgili sorunlara yol açabilir. Sorunlu alanlar kimlik doğrulama ve yetkilendirme, kimlik yönetimi, kaynak erişim kontrolü, güvenli bir şekilde dağıtılmış karar yürütme ve işbirliği, güvenlik ve hizmet kalitesi, bilgi paylaşım politikası alanlarıdır [20-21].

Makale sis bilişim için kritik ve sorunlu bir alan olan güvenlik konusunu işlemektedir. Birlikte çalışabilirlik ve korumayı sağlamak için ortak bir güvenlik temelinin olması gerekmektedir. Ancak IoT platformu da dahil olmak üzere sis bilişim teknolojilerinde gereken tüm güvenlik mekanizmalarını belirlemek için henüz tamamen bütünsel bir güvenlik çözümü geliştirilmemiştir.

Ayrıca, sis hesaplama yerine getirmesi gereken bölgesel ve devlet gerekliliklerinin bir kombinasyonudur. Güvenlik analizi için belirlenen yöntemlerin en önemli avantajı sis mimarisinin güvenlik alanında birleşik bir uygulama oluşturması ve çeşitliliği barındırmasıdır. Çalışmada ileri sürülen sis bilişim güvenlik platformu, verimlilik yönetimi, güvenlik noktası, güvenilir yürütme modu gibi bir çok donanım güvenlik işlemcisi uygulamalarını da içermektedir.

\* Sorumlu yazar: [fatih.topaloglu@ozal.edu.tr](mailto:fatih.topaloglu@ozal.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-2089-5214

Çalışmada belirlenen güvenlik yöntemlerinin bir diğer avantajı uç aygıtlar ve bulut bilgi işlem veri merkezleri arasında dağıtılan yaygın bir bilgi işlem altyapısı sunularak, yalnızca yüksek kullanılabilir gerçek zamanlı güvenilir bilgi işlem hizmetleri sunma yeteneğine sahip olmakla kalmaması, aynı zamanda dinamik çok katmanlı savunma uygulamaları için de iyi bir konuma sahip olmasıdır.

Sis bilişim verileri buluta taşıyan birçok basamaktan oluşur. Bu katmanlar karmaşıklıkları ve veri dönüşümlerini kapsar. Çalışmada mimari detaylarda yer alan performans, yönetilebilirlik, veri analizi ve benzer ayrıntı seviyelerine sahip kontrol gibi yüksek öncelikli perspektifleri tanımlayan bilgiler içermekle birlikte sis bilişimin güvenlik boyutları belirlenerek daha derin güvenlik analizi yapılmıştır.

Makalenin akışı, ikinci bölümde sis mimarisinin şifreleme işlemleri boyutu, üçüncü bölümde sis düğümlerinin güvenlik boyutu, dördüncü bölümde sis mimarisinin ağ güvenliği boyutu ve beşinci bölümde veri güvenliği boyutları için teknik güvenlik analizleri yapılmıştır.

## 2. Şifreleme İşlemleri Boyutu

Son kullanıcılara yakın olarak sis düğümleri, haksız saldırılara karşı savunmasız hale gelebilir [22-23]. Ancak bu sorun, şifre çözme ve şifreleme yaklaşımlarıyla etkin bir şekilde çözülebilir. Ayrıca, sis düğümleri genellikle bulut bilişimdeki uç cihazlarla ve veri havuzlarıyla etkileşime girmelidir. Tüm bu karmaşık işlemler, verileri saldırıya açık ve savunmasız hale getirir. Bu sorunu çözmek için maskeleyen teknikleri veya şifreleme algoritmaları kullanılmaktadır [24].

Sis mimarisinde şifreleme işlemleri gizlilik, bütünlük, kimlik doğrulama ve reddedilmeme gibi güvenlik hizmetlerini uygulamak için mekanizmalar sağlar. Şifreleme işlemleri, diğer nesnelere koruyan şifreleme anahtarlarını ve güvenlik ilkelerini korumak için bir güvenlik işlemcisinde uygulanmaktadır. Ayrıca, güvenilir yazılım için güvenli bir yürütme ortamı sağlamak, bellek, depolama ve reddedilmeme işlemlerini korumak için de kullanılmaktadır.

Sis hesaplama uygulamalarında; gizliliğin korunması için simetrik veya gizli anahtar şifreleri, kimlik doğrulama için şifreleme karma işlemleri, gizli anahtar, güvenlik kimlik bilgileri ve reddedilmeme için asimetrik veya ortak anahtar şifreleri kullanılabilir.

### 2.1. Kriptografik hızlandırıcı

Kriptografik hızlandırıcı, yoğun kriptografik işlemleri CPU' da çok daha verimli bir şekilde gerçekleştirmek için özel olarak tasarlanmış bir ortak işlemcidir. Birçok sunucunun sistem yükü çoğunlukla şifreleme işlemlerinden oluştuğu için, bu işlemci ile sunucu performansını büyük ölçüde arttırmaktadır. Kriptografik işlemlerin ve şifreleme hizmetlerinin önemli bir yavaşlama belirtisi göstermemesi, kriptografiyi hem iş hem de kişisel veri korumada siber güvenlik sisteminin önemli bir parçası haline getirdi. Sis hesaplama uygulamalarında kriptografik hızlandırma yalnızca yazılım algoritmalarıyla değil, sağlanacak ek donanımlar ile de gerçekleştirilmektedir.

Sis bilişimde bu sistemlerin nasıl entegre edileceğine bağlı olarak bilgisayar donanımına kriptografik hızlandırma getirmenin bir kaç faydası vardır. Bunlardan en önemlisi donanımlarının diğer operasyonel yönlere odaklanmasını sağlaması ve böylece donanım performansı ve operasyonel yetenekte önemli bir artış getirmesidir. Diğer avantajı gelişmiş güvenlik, sadece bu tür bir ortamda çalışmak üzere özel olarak tasarlanmış değil, aynı zamanda imalatçıların yetenekleri ile ilgili iddialarını test etmek için üçüncü taraflarca titizlikle test edilmiş olan donanım veya yazılımı kullanarak, hesaplama kaynakları sağlamak için güvenlik unsurlarından yararlanabilir.

Böylelikle kriptografik hızlandırma, ağ cihazlarında ve sunucularında giderek yaygınlaşan bir özellik haline gelebilir. Şifreleme ve şifre çözme, yeterli düzeyde koruma ve güvenlik gerektiren işletmeler ve bireylerin CPU'ları üzerindeki yükü azaltmalarını sağlayan araçlar korumayı sağlamak için muhtemelen bu gibi sorunlara çözüm önerisi olarak sunulabilir.

### 2.2. Gerçek rastgele sayı üretici

Birçok alanda rastgele sayılar gereklidir: kriptografi, Monte Carlo hesaplama ve simülasyonu, endüstriyel test ve etiketleme, tehlike oyunları, kumar vb. Bilgisayarlar deterministik olarak çalıştıklarından rastgele sayılar üretemezler. Bunun yerine rastgele sayılar iyi kontrol edilen ve özel olarak hazırlanmış bir fiziksel prosesi ölçerek çalışan gerçek rastgele sayı üreticileri (TRNG) kullanılarak elde edilir. Bir TRNG'nin rastgele olması kesin, bilimsel olarak karakterize edilebilir ve ölçülebilir.

Sis hesaplamada TRNG, bir algoritma yerine fiziksel bir işlemden rastgele sayılar üreten bir cihazdır. Bu tür cihazlar genellikle termal gürültü, bir ışın ayırıcıyı içeren fotoelektrik etki ve diğer kuantum fenomenleri gibi düşük seviyeli, istatistiksel olarak rastgele "gürültü" sinyalleri üreten mikroskobik fenomenlere dayanır. Bu, bilgisayar programlarında yaygın olarak uygulanan sözde rastgele sayı üretme paradigmasının tersidir .

Gerçek rastgele sayı üreteçleri tipik olarak, fiziksel olayların bazı yönlerini bir elektrik sinyaline dönüştüren bir dönüştürücüden , rastgele dalgalanmaların genliğini ölçülebilir bir seviyeye yükseltmek için bir amplifikatör ve diğer elektronik devrelerden ve bir tür analogdan çıkışı dijital bir sayıya dönüştürmek için dijital dönüştürücü, genellikle basit bir ikili basamak 0 veya 1'dir. Rastgele değişen sinyali tekrar tekrar örnekleyerek bir dizi rastgele sayı elde edilir.

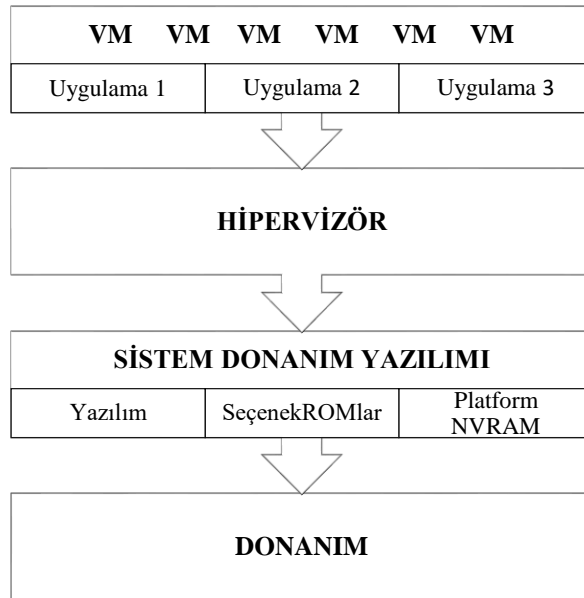
Sis bilişim platformunda TRNG, ana uygulama içinde rastgele kriptografi oluşturmak, güvenli veri iletimi için şifreleme anahtarları ve aktarım katmanını güvenliği gibi internet şifreleme protokollerinde yaygın olarak kullanılabilir.

### 2.3. Güvenli anahtar üretimi, şifreleme ve depolama

Kriptolojide anahtar üretimi zorlu bir görevdir çünkü Kerckhoff prensibine göre saldırganın şifreleme sistemi hakkında anahtar haricinde her şeye ulaşabildiği varsayımı altında sistemin ne kadar güvenli olduğu değerlendirilmektedir [25]. Tüm işlemciler platform güvenlik işlemcisi olarak bilinen küçük bir yonga içerir. Bu teknoloji sis bilişimde bellek şifrelemesinden ve platform güvenliğinden sorumlu bir güvenlik yongası olmakla birlikte uzaktan yönetim için de kullanılabilir. Sertifikalar, anahtarlar ve şifreler için güvenli bir kasa görevi görebilir ve pahalı jetonlara olan ihtiyacı ortadan kaldıracaktır.

### 3. Düğüm Güvenliği Boyutu

Bilgisayarların veri merkezleri altyapısı için en çok “hipervizör tabanlı sanallaştırma teknolojileri” ve bulut bilişim diye bilinen “konteyner teknolojileri” kullanılmaktadır. Bu iki teknoloji; verimlilik, yönetim kolaylığı, güvenlik gibi birçok faydaları nedeniyle tercih sebebidir. Yapılan çalışmada hipervizör tabanlı sanallaştırma mimarisi kullanıldığı varsayılarak analiz yapılmıştır. Sis bilişim çözümlerinde sanallaştırma şart olmadığı gibi, kullanılmaması halinde hipervizör katmanına da ihtiyaç ortadan kalkacaktır.



Şekil 1. Düğüm güvenliği mimarisi.

Düğüm mimarisi Şekil 1'de dört yatay bölgeye ayrılmıştır: Birincisi, en altta harici cihazlar dahil donanım bileşeni katmanıdır. Burada bir dizi isteğe veya kullanım durumuna bağlı donanım hızlandırıcıları, şifreleme cihazı ve jenerik hızlandırıcılar bulunmaktadır.

İkincisi sistem donanım yazılımı, seçenek ROM'ları ve Platform NVRAM bulunur. Bu bileşenlerin doğası ve varlığı platforma bağlıdır. Kök güvenilirlik ve güven zinciri uzantısını desteklemek için, açıldıktan sonra platformda çalıştırılacak ilk kod olan güvenilir sistem ROM'unda yerleşik bir üretici yazılımı uygulaması olmalıdır.

Üstünde Hipervizör katmanı vardır. Sanal aygıt örneklerini başlatır, yönetir, bunları işlemler, yönetim ve idare sistemi tarafından yönlendirildiği gibi sanal makinelere atar. Bu sanal cihazlar, veri için hipervizörü atlayan veya yazılım tarafından taklit edilen sanal örnekler olarak tamamen desteklenebilir.

Son katman, sanal makinelerin başlatıldığı katmandır. Fiziksel kaynaklar burada hipervizör tarafından sanal kaynaklar olarak eşleştirilir. Sanal makinelerdeki işletim sistemi, ayrı uygulama adres alanları veya Linux kapsayıcıları olarak başlatılabilecek uygulama adres alanlarını yönetir.

Sis mimarisinde katmanları bağlayan ve güvenilir bileşenlerden oluşan güvenli bir Güven Zinciri oluşturmaya yardımcı olan sistem hizmetleri sağlayan bir dizi işlev vardır. Sis mimarisinde, güvenilir yürütme ortamını başlatan ve hipervizöre hizmet veren güvenlik motorudur. Yönetici hipervizör katmanında gösterilen sanal güvenlik motorunu, her güvenilir sanal makinede yerleşik bir araçla sanallaştırır.

Bir diğer işlev, sanal makineyi içeren bir güven zinciri oluşturmak için her bir firma yazılımı veya yazılım yükünü doğrulayan ve ölçen güvenilir önyükleme yazılımıdır. Sis platformunda güvenilir önyükleme mekanizması yazılımı birbirini izleyen her kod yükünün güven zincirinin genişletilmesine izin vermek ve güvenilir olmasını sağlamak içindir.

### 3.1. Çalışma zamanı bütünlük denetimi

Sis mimarisinde bir saldırganın sistem çalışırken yazılımı değiştirmeye çalışması da muhtemeldir. Bu amaçla doğrudan XIP NOR flaşında veya NAND flaş uygulamaları için harici RAM'de yazılım görüntüsünü önyükleme sonrası periyodik olarak doğrulayan çalışma zamanı bütünlük denetimi özelliğine ihtiyaç vardır. Çalışma zamanı bütünlük denetimi işlemi, çalışma zamanı değişikliklerini karşılamak için küçük değişiklikler yaparak güvenli önyükleme işlemine benzer.

Çalışma zamanı bütünlük denetimi işlevi, kendi atanmış RAM'i olan bir güvenli yürütme ortamında çalıştırılmalıdır; burada çalışma zamanı bütünlük denetimi işlevine bir saldırgan tarafından müdahale edilmediği garanti edilir. Bir saldırganın çalışma zamanı bütünlük denetim kodunu veya çalışma zamanı bütünlük denetimini ilk olarak çağıran prosedürü değiştirmeye çalışabileceği düşünüldüğünde, çalışma zamanı bütünlük denetiminin bir güvenli yürütme ortamında çalışması gerektiği açıktır. Güvenli yürütme ortamı ayrıca, periyodik olarak çalışma zamanı bütünlük denetimi işlevini tetikleyen bir güvenli zamanlayıcıya sahip olmalıdır.

Sis uygulamalarında yazılım bütünlüğünün korunmasına yardımcı olan isteğe bağlı mekanizmalar, birden fazla anahtar çiftinin desteklenmesi gerektiği durumlarda anahtar yönetimi için bir yazılım mekanizmasını içerir. Yazılım sürümü iptal mekanizması, üreticinin sistemi yeni bir yazılım sürümüne ilerletmek ve eski bir sürüme geri dönmeyi önlemek isteyebileceği uzun ömürlü sistemler için önemlidir.

Böyle bir durumda, güvenli önyükleme imzasının bir parçası olarak bir yazılım sürümü sayacı bağlanır ve bu mekanizma etkinleştirilir. Sis bilişimde çalışma zamanı bütünlük denetimi yazılım görüntüsünün bütünlüğünü sürekli olarak kontrol ederek çevrimiçi saldırıları gerçek zamanlı olarak belirleyebilir.

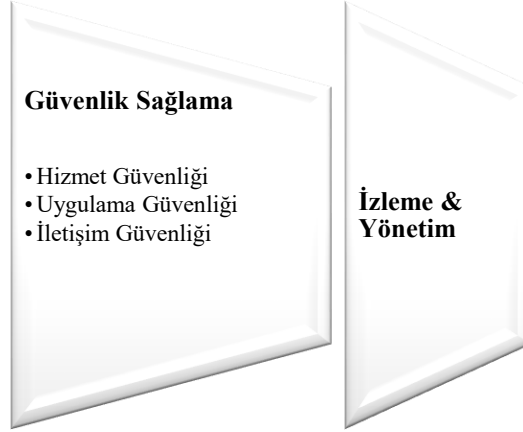
### 3.2. Hata ayıklama, performans izleme ve profil kontrolü

Tersine mühendislik koruması, aygıt çalışırken ve çip belleğinde kod bulunduğunda güvenlik operasyon merkezine (SoC) fiziksel erişimi önleyerek yetkisiz hata ayıklamayı JTAG aracılığıyla önleyen bir Güvenli Hata Ayıklama özelliği de gerektirir.

Cihazın kopyalanmasını önlemek için flaş bellekte bulunan yazılım görüntüsü benzersiz bir anahtar kullanılarak şifrelenir. Yalnızca belirli bir SoC, yazılım görüntüsünün şifresini çözerek yazılımı belirli bir yongaya etkili bir şekilde bağlayabilir. Sis mimaride klonlanan herhangi bir cihaz, yazılım görüntüsünün şifresini çözemez ve bu da cihazı işe yaramaz hale getirir.

## 4. Ağ Güvenliği Boyutu

Uç aygıtlar ve bulut bilgi işlem veri merkezleri arasında dağıtılan güvenli bir sis platformu, yalnızca yüksek kullanılabilirlik ve gerçek zamanlı bilgi işlem hizmetleri sunma yeteneğine sahip olmakla kalmayıp aynı zamanda dinamik çok katmanlı savunma için de iyi bir konuma sahiptir.



**Şekil 2.** Operasyonel düzlemler ve işlevsel katmanlar.

Şekil 2'de Güvenlik Sağlama ve Güvenlik İzleme iki operasyonel düzlemleriyle uçtan uca güvenlik sağlayan mimariyi göstermektedir. Güvenlik Sağlama Yönetimi, İletişim Güvenliği, Hizmet Güvenliği ve Uygulama Güvenliği olmak üzere üç işlevsel katmandan oluşur.

#### 4.1. İletişim güvenliği katmanı

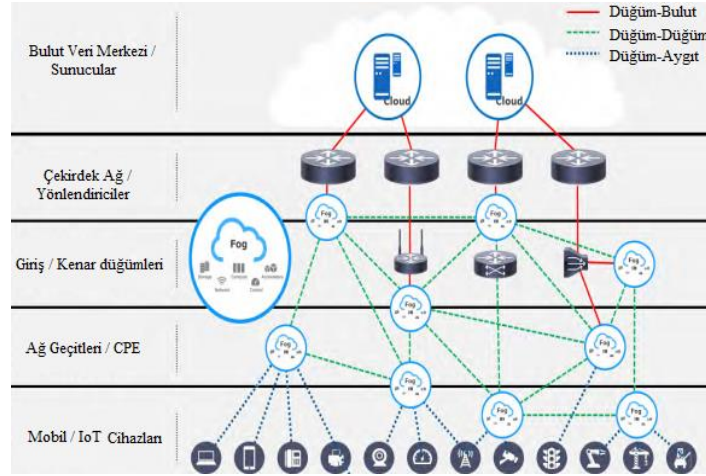
Ayğıttan buluta iletişim genellikle TCP veya UDP kanalları üzerinden gerçekleşir. TCP bağlantı yönelimli ve güvenilirdir, yani gönderilen her veri paketinin alındığını onaylaması gerekir. Ancak büyük güvenilirlik ile büyük yük gelir ve bazen bir IoT uygulaması için TCP başlığı, yükün kendisinden daha büyük olabilir. Öte yandan UDP, bağlantısız ve güvenilmezdir, yani hız açısından veri paketlerinin kaybına izin verir. TCP, verilerin geçmesi gereken yerlerde kullanılırken, bazı veri kayıplarının kabul edilebilir olduğu yerlerde UDP kullanılır. Bu katman, Cihaz-Sis-Bulut Bilişim Hiyerarşisindeki tüm varlıklar arasındaki tüm fiziksel veya sanal iletişim kanallarında Tablo 1'deki iletişim güvenliği hizmetlerini uygular.

**Tablo 1.** İletişim güvenliği.

Gizlilik	Bütünlük	Kimlik Doğrulama	Reddetmeme
Bağlantı ve Bağlantısız Veri Gizliliği	Kurtarma ile Bağlantı Bütünlüğü	Bağlantısız İletişim için Veri Kaynağı Kimlik Doğrulaması	Kaynağı Reddetmeme
Trafik Akışı Gizliliği	Algılama ile Bağlantısız Bütünlük	Bağlantı Tabanlı İletişim için Eş Varlık Kimlik Doğrulaması	Hedefin Reddedilmemesi
	Tekrar oynatma koruması	Kimliği Doğrulanmış Kanal Erişim Kontrolü	

Şekil 3'de gösterildiği gibi Cihaz- Sis- Bulut Bilişim sürekliliğinde gerçekleşen iletişim, Düğüm→ Buluta, Düğüm → Dügüme ve Dügümden→Aygıta gibi üç tür güvenli iletişim yolu olarak kategorize edilebilir.





Şekil 3. Güvenli iletişim yolları.

**Düzümden Buluta Güvenli İletişim Yollarında**, güçlü kimlik doğrulama ve reddetme hizmetleri, sis düğümüne kurulan donanım güven kaynağından türetilen güvenlik bilgileri kullanılarak uygulanacaktır. Tüm şifreleme işlemleri sis düğümlerine gömülü kriptohızlandırıcıları tarafından gerçekleştirilirken, şifreleme anahtarları güvenlik izleme ve yönetim işleminin bir parçası olarak yönetilecektir.

**Düzümden Düzüme Güvenli İletişim Yollarında**, dağıtılmış bir sis bilgi işlem platformu, birden fazla internet alt ağına veya yönetim alanına yayılmış sis düğümleri hiyerarşisinden oluşabilir ve bu sis düğümlerinin belirli hedefleri gerçekleştirmek için birbirleriyle koordinasyon yapmaları beklenir. Sis bilişimde hem doğrudan hem de zamanında etkileşimi sağlamak için, işleme dayalı istemci-sunucu bilgi işlem modeline ve olaya dayalı yayınlama-abone olma mesajlaşma modellerine dayalı düğümler arası bilgi alışverişleri uygulanacaktır.

**Düzümden Cihaza Güvenli İletişim Yollarında**, genellikle bulut sunucularının proxy'leri olarak işlev gören sis düğümleri iletişiminin, ön uç aygıtları tarafından kullanılan iletişim protokollerini ve API'leri koruması beklenir. Cihaz iletişim protokollerinin seçenekleri farklı uygulamalar ve iletişim ortamları arasında çeşitlendirilmiştir.

Sis Mimarisinde internet protokollerine uyarlanan ön uç aygıtları arasında, ön uç aygıtlarına verilen güvenlik kimlik bilgileri kullanılarak güçlü kimlik doğrulama uygulanabilir. Şifreleme anahtarları, güvenlik izleme ve yönetim işleminin bir parçası olarak yönetilebilirken, tüm şifreleme işlemleri ön uç aygıtlarındaki kriptohızlandırıcılar tarafından gerçekleştirilebilir.

#### 4.2. Hizmetler güvenlik katmanı

Yazılım tanımlı ağ uygulamalarının artan kullanımı ile özel cihazlar, sanal makinelerde ve Linux kapsayıcılarında yazılım çözümleri olarak giderek daha fazla uygulanmaktadır. Tablo 2'de listelenen cihazlarla birlikte, bu güvenlik cihazı kategorisine genellikle ağ fonksiyonu sanallaştırma veya bireysel olarak sanal ağ fonksiyonları denir. Bu katman, geleneksel olarak Tablo 2'deki hizmetleri sunar.

Tablo 2. Hizmetler güvenlik katmanı hizmetleri.

Ağ güvenliği aygıtları tarafından sağlanan bilgi güvenliği hizmetleri	Güvenlik hizmetleriyle birlikte verilen ağ hizmetleri
Derin Paket Denetimi (DPI)	vRouters
Uygulama Katmanı Proxy'si Ful Yasal Mesaj Durdurma	WAN Hızlandırıcıları
Saldırı Tespit ve Koruma Sistemleri (IPS / IDS)	Address Ağ Adresi Çevirmenler (NAT)
Sistem / Ağ Olayı ve Durum İzleme	İçerik Dağıtım Sunucuları
İçerik Filtreleme ve Ebeveyn Kontrolü	

Sis mimaride hizmet içi iletişim için kriptografik kimlik doğrulama ve yetkilendirme kullanılır. Bu, yöneticiler için soyutlama ve ayrıntı düzeyinde güçlü erişim kontrolü sağlar. Bununla birlikte IP sahtekarlığını önlemek için ağı çeşitli noktalarında giriş ve çıkış filtreleri kullanılmalıdır.

Bir hizmeti aynı makinede çalışan diğer hizmetlerden korumak için kullanılacak teknikler Linux kullanıcı ayrımı, dil ve çekirdek tabanlı sanal alanlar ve donanım sanallaştırmasıdır. Ayrıca riskli iş yükleri için daha fazla izolasyon katmanı kullanılmalıdır.

#### 4.3. Uygulama güvenliği katmanı

Uygulama katmanı, kullanıcılar için bir kullanıcı arabirim görevi görür. Bu katmanın ana işlevi, farklı uygulamaların yönetimini kolaylaştırmaktır. Uygulama katmanı sis hiyerarşisinin ön ucudur ve bu nedenle perspektifli uygulamalar olarak farklı güvenlik standartlarına ihtiyaç duyar. Farklı uygulamaların farklı gereksinimleri olduğundan, bu seviyeyi güvenli hale getirme görevi çok karmaşık ve zordur. Güvenlik tehditleri, mevcut ve ağda kullanılan protokollere göre değişir. Sis platformu için ilgili protokoller MQTT, AMQP, CoPA ve XMPP'dir.

### 5. Veri Güvenliği Boyutu

Verilerin sis sisteminde bulunduğu üç genel kategori vardır: Kullanımdaki veriler, beklemedeki veriler ve hareket halindeki veriler.

#### 5.1. Kullanımdaki veriler

Kullanılan veriler, bir sabit sürücüde veya harici depolama ortamında pasif olarak saklanmayan, bir veya daha fazla uygulama tarafından işlenen verilerdir. Ayrıca, çeşitli uç noktalardan erişen kullanıcılar tarafından görüntülenen verileri de içerir. Sis mimarisinde veriler, sistemde nerede olduğuna ve onu kimlerin kullanabildiğine bağlı olarak farklı tehdit türlerine karşı hassastır. Kullanımdaki veriler için en savunmasız nokta, kullanıcıların bu verilere erişebileceği ve onlarla etkileşime girebileceği uç noktalardadır.

Sis platformundaki bir veri kümesinin potansiyel olarak birden çok uç noktadan çalışan birden fazla kullanıcısı olabilir. Kişisel cihazlardan ana bilgisayar verilerine erişen çok sayıda şirket içi sistem, cihaz ve çalışan, bu verilerin güçlü kullanıcı kimlik doğrulaması, kimlik yönetimi ve profil izinleriyle korunması gerektiği anlamına gelir. Bu, yalnızca uygun izin ve bilgiye sahip kişilerin verilere erişmesini ve bunları değiştirmesini sağlar.

**Bellek şifreleme**, sis sistemini çeşitli saldırılara karşı korumak için ana bellek şifrelemesi kullanılabilir. Veriler günümüzde diskte bozulmadan şifrelenmiş olsa da, DRAM'da açık bir şekilde saklanır. Bu, verileri yetkisiz yöneticiler, yazılımlar ve donanım koruması ile gözetleme konusunda savunmasız bırakabilir. Şifreleme olmadan, hassas veriler, şifreler veya gizli anahtarlar kolayca tehlikeye atılabilir.

Sis mimaride tam bellek ve kısmi bellek olmak üzere iki farklı model ile bellek şifreleme yapılabilir. Tam bellek şifrelemeyle, tüm DRAM içerikleri, yapay önyükleme, DRAM arabirimi gözetleme ve benzer türden saldırılara karşı güçlü koruma sağlayan rastgele anahtar kullanılarak şifrelenir. Kısmi bellek şifrelemesi, yöneticiye ve işletim sistemine seçici olarak şifreleme esnekliği sağlar.

#### 5.2. Beklemedeki veriler

Beklemedeki veriler, bir aygıtta veya yedekleme ortamında herhangi bir biçimde depolanan verilere karşılık gelen bir terimdir. Sabit sürücülerde, yedekleme bantlarında, tesis dışı bulut yedeklemesinde veya hatta mobil cihazlarda depolanan veriler olabilir. Veriyi bekletmeye iten şey, şu anda bir ağ üzerinden iletilmeyen veya aktif olarak okunmayan veya işlenmeyen etkin olmayan verilerdir.

Sis mimaride beklemedeki veriler bir hedefe ulaşmış verilerdir. Bu hedefe, şifreleme, çok faktörlü kimlik doğrulama ve hem dijital hem de fiziksel erişim kontrolleri gibi ek güvenlik katmanları eklenebilir. Beklemedeki veriler sis platformunun neresindeyse her zaman şifrelenmelidir.

Beklemede olan verilerin güvenliğini sağlamak ve şifrelemek için genellikle üç yöntem vardır:

**Tam Disk Şifrelemesi**, donanım düzeyinde şifrelemedir. Sis platformunda, bir cihazdaki tüm kullanıcı verilerini şifrelenmiş bir anahtar kullanarak kodlama işlemini gerçekleştirir. Bir aygıt şifrelendikten sonra, kullanıcı tarafından oluşturulan tüm veriler diske yüklenmeden önce otomatik olarak şifrelenir ve tüm okumalar, çağrı sürecine geri dönmeye kadar verilerin şifresini otomatik olarak çözer.

Sis mimaride tam disk şifrelemenin avantajı, başlangıçta cihazın kilidini açtıktan sonra son kullanıcının özel bir dikkat gerektirmemesidir. Veri yazıldıkça, otomatik olarak şifrelenir. Okunduğunda otomatik olarak şifresi çözülür. Ancak işletim sistemi de dahil olmak üzere sabit sürücüdeki her şey şifrelendiğinden ,şifreleme ve şifre çözme işleminin, özellikle sanal belleğe yoğun bir şekilde erişimde veri erişim sürelerini yavaşlatabilir.

**Dosya Sistemi Şifrelemesi**, belirli dosyaları dosya, dizin ve klasör bazında korumak için ayrı bir anahtar tabanlı erişim ve kimlik doğrulama mekanizması kullanarak gerçekleştirir. Sis platformu simetrik şifreleme algoritması kullanır, çünkü büyük miktarda veriyi şifrelemek ve şifresini çözmek, asimetrik bir anahtar şifresinin kullanılmasından daha az zaman alır. Kullanılan simetrik şifreleme algoritması, işletim sisteminin sürümüne ve yapılandırmasına bağlı olarak değişecektir.

**Dosya Sistemi Erişim Kontrol Mekanizmaları**, kullanıcı kimliği veya grup kimliği ile belirli dosyalara veya dosya gruplarına erişimi kısıtlamak için kullanılabilir. Tüm modern dosya sistemleri dosya izinlerini bir biçimde uygular. Tablo 3'de gösterildiği gibi temel dosya izinleri, izin türleri kullanılarak izin gruplarına uygulanır.

**Tablo 3.** Dosya sistemi işlemleri için izin grupları ve türleri.

İzin Grupları	İzin Türleri
Kullanıcı izinleri: yalnızca dosyanın veya dizinin sahibi için geçerlidir.	Okuma izni: kullanıcının dosyanın içeriğini okuma yetkinliği. ifade eder.
Grup izinleri: yalnızca dosyaya veya dizine atanmış grup için geçerlidir.	Yazma izni: kullanıcının bir dosyayı veya dizini yazma veya değiştirme yetkinliği.
Tüm Kullanıcı izinleri: sistemdeki diğer tüm kullanıcılar için geçerlidir.	Yürütme izni: kullanıcının bir dosyayı yürütme veya bir dizinin içeriğini görüntüleme yetkinliği.

Erişim Kontrol Listesi sis mimarisinde bir dosya, klasör veya başka bir nesne için kullanıcı izinlerinin belirlendiği listedir. Kullanıcıların ve grupların hangi nesneye erişebileceklerini ve hangi işlemleri gerçekleştirebileceklerini tanımlar. Bu işlemler genellikle okuma, yazma ve yürütmeyi içerir.

### 5.3. Hareketli veri

Hareket halindeki veriler, bir sis platformunda şu anda bir ağ üzerinde seyahat eden veya okunmaya, güncellenmeye veya işlenmeye hazır bir bilgisayarın RAM'inde oturan verilerdir. Yerelden bulut depolamaya veya merkezi bir ana bilgisayardan uzak bir terminale ağlar üzerinden veri geçişi, verilerin kaynağı ve hedefi arasındaki herhangi bir makine veya bilgisayar korsanı tarafından okunamayacak veya değiştirilemeyecek şekilde şifrelenmelidir. Hareket halindeki bu veriler, kablolar arasında hareket eden verileri ve kablosuz iletimi içerir.

Şifreli bağlantı, gönderilecek bilgilerin şifreleme durumuna bakılmaksızın, ağ bağlantısı üzerinden gönderilen her şeyin otomatik olarak şifrelendiği bağlantıdır. Aktarım sırasında verileri harekete geçirmenin başka bir yöntemi de zaten şifrelenmiş bir dosya kullanmaktır. Şifrelenmiş bir dosya şifreli biçimde bulunduğundan, her zaman şifrelenir ve bu nedenle korunur.

## 6. Tartışma ve Öneriler

Şifreleme işlemleri boyutu gizlilik, bütünlük, kimlik doğrulama ve reddedilmeme gibi güvenlik hizmetlerini uygulamak için mekanizmalar sağlar. Daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak sis mimarisi, bileşenleri arasında birlikte çalışabilirlik seviyesini garanti etmek için yapılan çalışmada FIPS 140-2 [ref-a], [ref-b] şartnamesi referans alınarak çözüm önerileri sunulmuştur.

Mevcut uygulamalarda güvenlik işlemcisi genellikle işletim sistemi ile bire bir ilişki varsayar, böylece güvenlik işlemcisi işlevleri sanal bir ortamda yalnızca hipervizör tarafından kullanılabilir. Bu, sanal bir makinede yürütülen bir işletim sisteminin, çiplak metal bir ortamda çalışacağı için güvenlik işlemcisinin güvenli depolama ve şifreleme işlevlerini kullanabilmesine rağmen, bunu yapamayacağı anlamına gelir. Yapılan çalışmada çözüm önerisi olarak, sanal makinelerin çok sayıda tasarımı yerine mevcut kaynaklarla sınırlı, sanal platform güvenlik işlemcisi ile bire bir ilişki sürdürmesine izin veren bir sanal güvenlik işlemcisinin uygulanması sunulmuştur.

Donanım rastgele sayı üreticilerinin ana kullanımı veri şifrelemedir, örneğin verileri şifrelemek için rastgele şifreleme anahtarları oluşturmaktadır. Bunlar, bilgisayarlarda yaygın olarak kullanılan rastgele sayılar üretmek için kullanılan Sahte Sayı Üreteçleri (PRNG) yazılımlarına daha güvenli bir alternatiftir. PRNG'ler sayısal diziler üretmek için hesaplanabilir bir algoritma kullanır.

Literatür çalışmalarında benimsenen PRNG'ler tarafından üretilen sayı dizisi tahmin edilebilir olduğundan, yalancı sayılarıyla şifrelenen veriler kriptoloji karşı potansiyel olarak savunmasızdır. Donanım TRNG'leri tahmin edilemeyen sayı dizileri üretir ve bu nedenle verileri şifrelemek için kullanıldığında en yüksek güvenliği sağlar. Yapılan çalışmada, PRNG çözümünün aksine bir TRNG çözümü benimsenmiştir. Bu işlevsellik bir ISA uzantısı olarak veya ayrı bir hızlandırıcı cihaz aracılığıyla uygulanabilir.

Mevcut çalışmalarda düğüm güvenliğinde temel varsayım, hipervizörün kendisine güvenilmesi esasına dayanır. RTIC yalnızca sanal cihazları kontrol etmek için kullanılır. Sayfa mekanizmaları, yazılmaması gereken sayfaları yazmaları algılayacak şekilde değiştirildiğinden, kullanılan mekanizmalar çoğunlukla pasiftir. Yetkisiz bir değişiklik tespit etme eylemi politika tarafından yönlendirilir ve genellikle sanal cihazlarda sonlandırılır. Yapılan çalışmada bu sorun için şifrelenmiş bir "kapsayıcı" (Linux kapsayıcılar ile karıştırılmamalıdır) kod ve verileri dış saldırılardan koruyacak bellek şifrelemesi önerilmiştir.

Ağ güvenliği boyutu uygulamalarında yapılan çalışmada Güvenlik Sağlama, Güvenlik İzleme ve Yönetimi ve üç işlevsel katman: İletişim Güvenliği, Hizmet Güvenliği ve Uygulamaları Güvenliği diğer çalışmalardan farklı olarak ITU-X.805 Tavsiyesi [X.805] ve Açık Ağ Kurulumu tarafından önerilen Yazılım Tanımlı Ağ (SDN) Mimarisi [ONF / SDN] ile de uyumludur. Çalışmada iletişim güvenliği noktasında belirlenen paradigmaları uygulamak için belirlenen güvenlik protokolleri Tablo 4, 5 ve 6'da verilmiştir.

**Tablo 4.** Düğümde buluta iletişim için güvenlik protokolleri.

Uygulamalar	İşlem Protokolleri	Güvenlik Protokolleri
Kurumsal Uygulamalar	HTTP üzerinden SOAP Servis Odaklı Mimari	WSS
Mobil/Kişisel Uygulamalar	RESTful HTTP/ COAP Kısıtlı Uygulama Protokolü	TLS / DTLS

**Tablo 5.** Düğümde düğüme iletişim için güvenlik protokolleri.

Paradigmalar	İşlem Protokolleri	Güvenlik Protokolleri
Müşteri Sunucusu	SOAP, RESTful HTTP/ COAP	WSS, TLS/DTLS
Yayınla- Abone	MQTT, AMQP, RPTS	TLS/DTLS

**Tablo 6.** Düğümde cihaza iletişim için güvenlik protokolleri.

Katmanlar	Protokoller
MAC katmanı	WLAN, WPAN, PLC:PRIME
Taşıma Katmanı	UDP, TCP
Uygulama Katmanı	COAP, MQTT, AMQP, RPTS
Güvenlik	Güvenli Cihaz Kimliği Medya Erişim Kontrolü (MAC) Güvenliği Port Tabanlı (Kimlik Doğrulmalı) Medya Erişim Kontrolü Tünel / Taşıma Modları (Datagram) Taşıma Katmanı Güvenliği

## 7. Sonuç

Sis bilişim ile ilgili birçok sorunun temeli, her yerde bağlantı ve heterojen organizasyon nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni, sis ortamlarında bulunan cihazların heterojen olmasıdır. Sis bilişim, bulut hiyerarşisinin ön ucudur ve bu nedenle belirli uygulamalara göre farklı güvenlik standartlarına ihtiyaç duyar. Farklı uygulamaların farklı güvenlik gereksinimlerinin olması çözüm sürecini karmaşık ve zor hale getirir. Güvenlik tehditleri, mevcut ve ağda kullanılan protokollere göre değişir.

Makale, farklı cihaz ve farklı güvenlik protokollerinden oluşan ve henüz gelişim aşamasında olan sis bilişim mimarisinin karşılaşılabilecek güvenlik tehditleri ve zorlukları esas alınarak teknik ve kapsamlı bir güvenlik analizini ortaya koymuştur. Ayrıca her bir başlık altında gelişmekte olan sis platformu için güvenlik analizine ilave olarak yazılımsal veya donanımsal güvenlik önerileri sunulmuştur. Bu bağlamda sürekli gelişen teknoloji ve çeşitli protokoller, güvenli sis sistemini gerçekleştirmek ve IoT'nin güvenliğini sağlamak için standartlar geliştirilmeli ve uygulanmalıdır.

## Kaynaklar

- [1] Bonomi F, Milito R, Zhu J, Addepalli S. Fog computing and its role in the internet of things. ACM 2012 In: workshop on Mobile cloud computing; MCC'12, August 17, 2012, Helsinki, Finland: pp. 13-15.
- [2] Suo H, Wan J, Zou C, Liu J. Security in the Internet of Things: A Review. in Proc. of IEEE 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering; March 2012, pp. 648-651.
- [3] Tewari A, Gupta BB. Security, privacy and trust of different layers in Internet-of-Things (IoTs) framework. Future Generation Computer Systems 2018, pp.909-920.
- [4] Miorandi D, Sicari S, De Pellegrini F, Chlamtac I. Internet of things: Vision, applications and research challenges. Ad hoc networks 2012; 10(7): 1497-1516.
- [5] Puthal D, Nepal S, Ranjan R, Chen J. Threats to networking cloud and edge datacenters in the internet of things. IEEE Cloud Computing 2016;3(3): 64-71.
- [6] Farooq MU, Waseem M, Khairi A, Mazhar S. A critical analysis on the security concerns of internet of things (IoT). International Journal of Computer Applications 2015; 11(7): 1-6.
- [7] Swamy SN, Jadhav D, Kulkarni N. Security threats in the application layer in IoT applications. IEEE 2017 in Proc. International Conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud; 10-11 Feb. 2017; Palladam, India: IEEE. pp. 477-480.
- [8] Granjal J, Monteiro E, Silva JS. Security for the internet of things: a survey of existing protocols and open research issues. Surveys & Tutorials 2015; 17(3): 1294-1312.
- [9] Xu LD, He W, Li S. Internet of things in industries: A survey. IEEE Transactions on Industrial informatics 2014; 10(4): 2233-2243.
- [10] Al Hamid HA, Rahman SMM, Hossain MS, Almogren A, Alamri A. A Security Model for Preserving the Privacy of Medical Big Data in a Healthcare Cloud Using a Fog computing Facility with Pairing-Based Cryptography. IEEE Access 2017; 5: 22313-22328.
- [11] Elmisery AM, Rho S, Botvich D. A Fog Based Middleware for Automated Compliance with OECD Privacy Principles in Internet of Healthcare Things. IEEE Access 2016; 4: 8418-8841.
- [12] Moosavia SR, Gia TN, Nigussie E, Rahmania AM, Virtanen S, Tenhunena H, Isoaho J. End-to-end security scheme for mobility enabled healthcare Internet of Things. Future Generation Computer Systems 2016; 64: 108-124.
- [13] Liu X, Deng RH, Yang Y, Tran HN, Zhong S. Hybrid Privacy-preserving Clinical Decision Support System in Fog-cloud Computing. Future Generation Computer Systems 2018; 78: 825-837.
- [14] Tang B, Chen Z, Hefferman G, Pei S, Wei T, He H, Yang Q. Incorporating Intelligence in Fog computing for Big Data Analysis in Smart Cities. IEEE Trans. on Industrial Informatics 2017; 13(5): 2140-2150.
- [15] Molina B, Palaub CE, Fortino G, Guerrieri A, Savaglio C. Empowering smart cities through interoperable Sensor Network Enablers, in Proc. of 2014 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC); 5-8 Oct. 2014; San Diego, CA, USA: IEEE. pp.7-12.
- [16] Cicirelli F, Guerrieri A, Spezzano G, Vinci A. An edge-based platform for dynamic Smart City applications. Future Generation Computer Systems 2017; 76: 106-118.
- [17] Mohanty SP, Choppali U, Kougianos E. Everything You wanted to Know about Smart Cities. IEEE Consumer Electronics Magazine (CEM) 2016; 5(3): 60-70.
- [18] Li Z, Zhou X, Liu Y, Xu H, Miao L. A Non-Cooperative Differential Game-Based Security Model in Fog computing. China Communications 2017; 14(1): 180-189.
- [19] Sharma V, Lim JD, Kim JN, You I. SACA: Self-Aware Communication Architecture for IoT Using Mobile Fog Servers. Mobile Information Systems 2017; 1-17.
- [20] Premarathne US, Khalil I, Atiquzzaman M. Secure and reliable surveillance over cognitive radio sensor networks in smart grid. Pervasive & Mobile Computing 2015; 22(C): 3-15.

- [21] Yaakob N, Khalil I, Kumarage H, Atiquzzaman M, Tari Z. By-passing infected areas in wireless sensor networks using BPR. *IEEE Transactions on Computers* 2015; 64 (6): 1594–1606.
- [22] Hu P, Ning H, Qiu T, Song H, Wang Y, Yao X. Security and privacy preservation scheme of face identification and resolution framework using fog computing in internet of things. *IEEE Internet of Things Journal* 2017; 4(5): 1143-1155.
- [23] Qiu T, Zhao A, Xia F, Si W, Wu DO. Rose: Robustness strategy for scale-free wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 2017; 25(5): 2944-2959.
- [24] Lee K, Kim D, Ha D, Rajput U. On security and privacy issues of fog computing supported internet of things environment, in: *International Conference on the Network of the Future* 2015; 1–3.
- [25] Özkaynak F. Sosyal Güvenlik Kurumu Biyometrik Kimlik Doğrulama Sisteminin Problemleri ve Olası Çözümleri. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi* 2016; 28(2): 185-188.



## Köpeklerdeki Uzun Kemiklerin Evrişimsel Sinir Ağları Kullanılarak Sınıflandırılması

Gülnur Begüm ERGÜN<sup>1\*</sup>, Selda GÜNEY<sup>2</sup>, Tahsin Gürkan ERGÜN<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Başkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup> Cerrahi Anabilim Dalı, Veteriner Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye

\*<sup>1</sup> gbcangoz@baskent.edu.tr, <sup>2</sup> seldaguney@baskent.edu.tr, <sup>3</sup> tahsingurkanergun@gmail.com

(Geliş/Received: 28/06/2020;

Kabul/Accepted: 16/12/2020)

**Öz:** Son yılların en popüler konularından olan derin öğrenme, pek çok alanda olduğu gibi biyomedikal alanda da sıkça kullanılmaktadır. Çeşitli görüntüleme yöntemleri ile elde edilen görüntüler kullanılarak hastalık ve kırık tespiti, biyolojik veri kestirimi, doku ve organ bölütlemesi, eksik veri tamamlanması gibi nice uygulama derin öğrenme algoritmaları sayesinde başarılı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Ancak bahsi geçen uygulamaların çok büyük bir çoğunluğu beşeri hekimlikte yapılırken, veteriner tıp geri planda bırakılmıştır. Özellikle literatürde bu alandaki eksikliğin fark edilmesi bu çalışma konusunun en büyük motivasyon kaynağı olmuştur. Bu çalışmada, Ankara Büyükşehir Belediyesi Sokak Hayvanları Geçici Bakım Evi'nden alınan, köpeklere ait röntgenleri içeren geniş kapsamlı bir veri seti, derin öğrenme algoritmaları ile işlenmiştir. Amaç, köpeklere ait X-Ray görüntülerinden uzun kemiğin çeşidinin belirlenmesidir. Biyomedikal görüntü işleme alandaki pek çok çalışma gibi, bu çalışmada da Evrişimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN) mimarileri kullanılmıştır. AlexNet, GoogLeNet ve VGG-19 derin öğrenme modelleri ile öğrenme aktarımı gerçekleştirilmiş, destek vektör makineleri (Support Vector Machines, SVM) ile sınıflandırma performansı test edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Derin öğrenme, evrişimli sinir ağları, görüntü işleme, uzun kemikler, sınıflandırma.

### Classification of the Long Bones in Dogs Using Convolutional Neural Network

**Abstract:** Deep learning, one of the most popular topics of recent years, is frequently used in the biomedical field. Disease and fracture detection, data estimation, tissue and organ segmentation, and many other applications are successfully carried out with deep learning algorithms. However, while these applications are valid for human medicine, veterinary medicine is left behind. So, the deficiency in the literature about animal's X-Ray images processing has been the biggest motivation for this study. In this work, a comprehensive dataset containing dog X-Rays taken from Ankara Metropolitan Municipality Stray Animals Temporary Nursing Home, was processed with deep learning algorithms. It is aimed to determine the type of long bone. Like many other studies, Convolutional Neural Networks'(CNN) architectures are utilized in this study, too. Transfer learning was carried out with AlexNet, GoogLeNet and VGG-19 deep learning models, and the classification performance was tested with Support Vector Machines (SVM).

**Key words:** Deep learning, convolutional neural networks, image processing, long bones, classification.

#### 1. Giriş

Son yıllarda teknolojinin gelişimine paralel olarak işlemci hızlarının artması, milyarlarca verinin çok kısa zamanlarda işlenmesine olanak tanımıştır. Bu teknolojik iyileşmeler ile literatürde derin öğrenme olgusu ortaya çıkmış, milyarlarca verinin işlenip aralarında anlamlı bir örüntü yakalanarak insanlığa faydalı çıktılar üretmesi amaçlanmıştır. Özellikle 2010 yıllarından sonra oldukça popüler hale gelen derin öğrenme algoritmalarının pek çok alanda uygulamaları bulunmaktadır [1]. Biyomedikal alana bakılacak olursa; manyetik rezonans (MR) ile tomografi görüntüleri kullanılarak hastalık ile kırık tespitinin, biyolojik veri kestiriminin, doku ve organ bölütlemesinin, eksik veri tamamlanmasının ve daha nice uygulamanın artık derin öğrenme algoritmaları sayesinde yüksek başarı oranları ile gerçekleştirildiği söylenebilir [2-5]. Ancak bahsi geçen uygulamaların neticesinde ulaşılan başarıların çok büyük bir çoğunluğu insandan alınan görüntülerle elde edilirken; hayvan anatomisinin derin öğrenme algoritmaları tarafından analizi, literatür taramasında tespit edilmemiştir. Oysaki insan vücudunda görülen hastalık ve yaralanmalara, hayvanlarda da rastlamak pek mümkündür. Hayvan sağlığı gerek evcil hayvan besleyen insanlar gerekse de gıda-taşımacılık vb. amaçlarla hayvan sahibi olan insanlar için göz ardı edilemeyecek bir önem arz etmektedir.

\* Sorumlu yazar: [gbcangoz@baskent.edu.tr](mailto:gbcangoz@baskent.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-8469-5484, <sup>2</sup> 0000-0002-0573-1326, <sup>3</sup> 0000-0003-0447-7677.



İnsan tabanlı veri setleri ile biyomedikal görüntü işlemede genel amaç; sınıflandırma, algılama, veri tamamlama ve bölütleme olarak kategorize edilebilir. Bu amaçlı yapılan çalışmaların genelinde MR ve tomografi görüntüleri kullanılmıştır [3,5]. Özellikle kemiklerdeki kırıkların tespit edilmesi yine bu alanda en çok çalışılan konulardan birisidir [5-7]. İnsan kemiklerindeki kırıklarının varlığı neredeyse uzman bir ortopedist kadar derin öğrenme algoritmalarınınca saptanabilmektedir [8,9]. Bu çalışmada, insan anatomisi üzerine yapılan çalışmaların hayvan anatomisine uygulanması ve sonuçlarının analiz edilmesi hedeflenmiştir.

Derin öğrenme algoritmaları, öğrenme aşamasında geleneksel makine öğrenmesi algoritmalarına oranla çok daha fazla veriye ihtiyaç duyarlar [10]. Veri sayısı, çeşitliliği ve verinin doğru ayrılmış olması bir algoritmanın başarısını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Bu da veri setinin olabildiğince çeşitli, güvenilir bir kaynak tarafından etiketlenmiş ve verilere uygun algoritmalar tarafından test edilmesi anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, Ankara Büyükşehir Belediyesi Sokak Hayvanları Geçici Bakım Evi'nden alınan, köpeklere ait röntgenleri içeren geniş kapsamlı bir veri seti; alanınca uzman veteriner ortopedistimiz tarafından uzun kemiklere göre etiketlenmiştir. Amaç, derin öğrenme algoritmaları ile köpeklere ait röntgen görüntülerinden uzun kemiğin çeşidini belirlemektir.

Bu alandaki pek çok çalışma gibi, bu çalışma da Evrimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network, CNN) kullanılarak denenmiştir [3,4,11,12]. Halihazırda birbirinden farklı birçok derin ağ mimarisi üretilmiş ve literatürde kabul görmüştür. Çalışma kapsamında da farklı derin ağ mimarileriyle en iyi sonuç elde edilmeye çalışılmıştır.

## 2. Literatür Çalışmaları

Biyomedikal görüntü işleme, derin öğrenme algoritmalarının en büyük uygulama alanlarından birisidir. Bu sebeple literatüre kazandırılmış fazlaca çalışma mevcuttur; ancak bu mevcut çalışmaların çok büyük bir kesimi beşeri hekimlik üzerinedir [5,6,7,9]. Oysa veteriner tıp için de benzer çalışmaları yapmak mümkündür. Genel olarak beşeri hekimlikte yapılan bu çalışmalar; sınıflandırma, algılama, veri tamamlama ve bölütleme gayesiyle yapılmıştır. Görüntüleme yöntemleri sayesinde alınan görüntülere bakılarak, sınıflandırma işleminde genelde hastalık var veya yok tanısı koyma; algılama işleminde lezyonlu bir bölgeyi tespit etme ve/veya işaretleme; bölütleme işleminde ise dokuların ve/veya organların bölümlendirilmesi ile hacim ve şekilsel bilgilerine ulaşılması hedeflenir. Bu hedeflere ulaşmada en çok tercih edilen ağ yapısı CNN'dir.

Türkiye'de görüntü işleme adına yapılan doktora tezleri incelendiğinde neredeyse üretilen her iki tezden birinin biyomedikal alanda olduğu söylenebilir. YÖK Tez Merkezi'nden edinilen verilere göre; 2010-2020 yılları arasında görüntü işleme konusunda yazılan 60 doktora tezinden 24 tanesinin biyomedikal alanda olduğu tespit edilmiştir [13]. Ayrıca son yıllardaki literatür incelendiğinde ortopedi dalının yanında görüntü işleme konusunun göz hastalıkları, nöroloji, göğüs hastalıkları, dermatoloji, kardiyoloji gibi diğer tıp dallarında da uygulandığı görülmektedir [14-29].

Ortopedi alanında, daha çok kırık tespiti ve eklem-doku bölütleme işlemleri üzerinde durulmuştur. Örneğin çocuklardaki distal tibial kırıkların saptanmasında CNN yönteminin başarısı incelenmiştir. 980 görüntü, InceptionV3 mimarisinde işlenmiş ve %95,9'luk bir performans yakalanmıştır [12].

Amacı menisküs yırtığı varlığına göre MR görüntülerini sınıflandırmak olan bir çalışmada R-CNN yöntemi ile %90,6'luk başarı elde edildiği gözlenmiştir [20].

Farklı hastalardan alınan X-ray görüntüleri ile geniş kapsamlı bir veri seti, dört farklı denetimli/denetimsiz öğrenme metodlarıyla test edilmiştir: lojistik regresyon, L2 ceza parametresi ile lojistik regresyon, k-NN ve CNN. Bu çalışmada ilgi çeken noktalardan bir tanesi en yüksek başarının CNN yerine k-NN algoritması ile elde edilmiş olmasıdır [21].

Literatürde ender rastlanan hayvan görüntülerinin işlenmesine, domuzlar ile gerçekleştirilen bir çalışma örnek olarak verilebilir. Domuzların X-Ray görüntüleri ile iskelet yapıları CNN uygulanarak bölütlenmeye çalışılmış ve %95 gibi bir başarı elde edilmiştir [22].

Koldaki kırık tespiti başarısını artırmak amacıyla AC-GAN (Auxiliary Classifier Generative Adversarial Networks) derin ağlarının da uygulandığı yayınlar vardır. Bu konuya örnek olarak verilebilecek bir çalışmada araştırmacılar, bu algoritma tabanlı yöntemlerinin %91,2 başarısı ile çalışmalarının ortopedistlere yardımcı olabileceklerini savunmuşlardır [23].

İnsanların uzun kemiklerindeki kırıkların tespitinde bölüt ve kontur histogramlarının kullanıldığı bir çalışmada, sınıflandırma görevi için YSA kullanıldığı gözlemlenmiştir [24].

Ön-arka plan pelvis görüntülerinde, femur boyun kırığı tespiti için genetik algoritma ile parametre en iyilemesi yapılan CNN ağı, %83 duyarlılık oranı ile başarılı bir çıktı üretmiştir. Farklı boyuttaki veriler ile eğitim

işleminin tekrarlanması sonucunda ise k boyuttaki verilerle yüksek başarılar elde edilebileceği söz konusu çalışmada vurgulanmıştır [25].

İskelet-kas doku bltlemedesindeki CNN performansı ile kemik yaşı kestirimi gibi araştırmalar da rastlanabilecek yayın konularındandır [26-27].

İnsan bileğini kırık ve sağlam olacak şekilde iki sınıfa ayıran bir çalışmada; yazarlar 695'i kırık, 694' sağlam olmak üzere toplamda 1389 görüntü ile çalışmışlardır. InceptionV3 mimarisiyle %95,4'lk başarı elde eden bu çalışma, öğrenme aktarımı (transfer learning) yönteminin medikal görüntülerde başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir [28].

İnsanda femur kırıklarını normal ve atipik olmak üzere iki sınıfa ayıran bir çalışmada ise, 397'si atipik, 399'u normal femur kırığından oluşan veri kümesiyle yine önceden eğitilmiş derin ağlar test edilmiştir. VGG-19, ResNet-50 ve InceptionV3 mimarilerinden sırasıyla %82,7, %89,4 ve %90,5 başarı oranları elde edilmiştir. Araştırmacıların önerdikleri metot ile bu oranlar sırasıyla %92,2 %93,4 ve %94,4 oranlarına kadar çıkarılmıştır [29].

### 3. Veri Seti

Derin ğrenme algoritmalarının eğitim işlemi için fazlaca veriye ihtiyaç duyulur ve verilerin niteliği başarılı bir çalışmanın temelini oluşturur [30]. Bu temel in sağlam atılabilmesi adına veri setinin oluşturulma aşamasında, alanında uzman veteriner ortopedistimizle birlikte çalışılmış, çalışılmaya da devam edilmektedir.

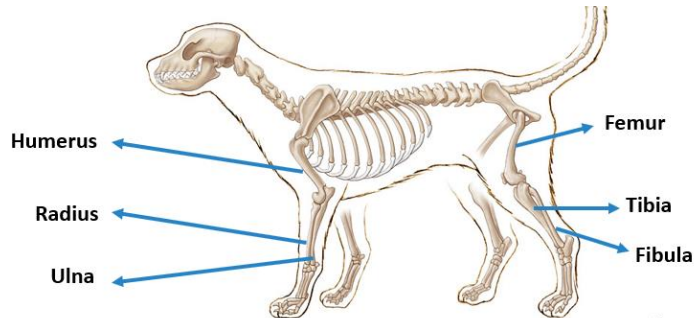
Çalışma kapsamında öncelikli olarak köpeklerdeki uzun kemiklerin sınıflandırılması hedeflenmiştir. Bu hedefin Ankara Büyükşehir Belediyesi Sokak Hayvanları Geçici Bakım Evi'nden alınan, köpeklere ait röntgenleri içeren geniş kapsamlı bir veri seti ile gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

Röntgen görüntülerinin çoğu Fujifilm markasının CR-IR-392 modeline ait görüntüleme cihazı sayesinde çekilmiş, FVS-1000 adındaki bir arayüz programı vasıtasıyla gönderilen lazer işınının anlamlı görüntülere dönüştürülmesi sağlanmıştır. FVS-1000 programında incelenen görüntüler kırılarak .png uzantılı resimler haline getirilmiştir. Bu şekilde şu ana dek 2439 adet görüntü incelenmiştir. İncelenen görüntülerden 669 tanesi femur, 263 tanesi humerus, 283 tanesi radius-ulna ve kalan 604 tanesi de tibia olacak şekilde toplamda 1819 adet görüntü, köpeklerdeki uzun kemiğin cinsine göre dört farklı sınıfa ayrılmıştır. 620 görüntü ise, alan dışı ya da görüntüleme esnasındaki yapılan hatalarla kaydedilen görüntüler olup veri setine dahil edilmemiştir. Veri setinin daha iyi anlaşılması adına veri setine ait detaylar Tablo 1'de verilirken, köpeklerdeki uzun kemikleri belirten bir görsel ise şekil 1'de sunulmuştur. şekil 1'de gösterilen ve uzun kemik çeşitlerinden biri olan fibula, aksesuar kemik olup vücut yükünü taşımada etkin rol oynamadığı için bu çalışmada fibula adını taşıyan bir sınıf oluşturulmamıştır.

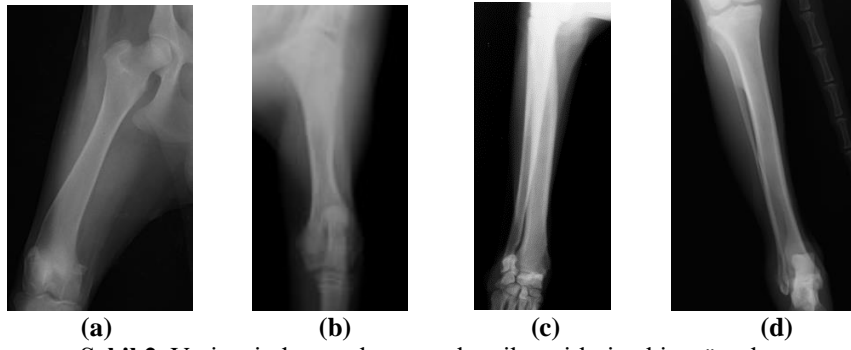
şekil 2'de ise örnek olarak veri setindeki her bir uzun kemiğe ait X-Ray görüntüsüne yer verilmiştir.

**Tablo 1.** Veri Seti

Kemik Adı	Görüntü Sayısı
Femur	669
Humerus	263
Radius-Ulna	283
Tibia	604



**şekil 1.** Köpeklerde uzun kemikler [31].



**Şekil 2.** Veri setinde yer alan uzun kemik çeşitlerine birer örnek.

Sol baştan; a) femur, b) humerus, c) radius-ulna ve d) tibia.

#### 4. Materyal ve Metot

Bu çalışma da görüntü işlemedeki başarısı nedeniyle CNN algoritması kullanılmıştır [32]. Algoritmada eğitim ve test kümeleri veri setinden rastgele seçilmiş olup oranları sırasıyla %80 ile %20 olarak belirlenmiştir. Veri setinde farklı sınıfların farklı görüntü sayılarına sahip olması sebebiyle, her sınıftan yine rasgele seçilen 211'er görüntü modele girdi olarak verilmiştir. Girdi olarak verilen tüm MR görüntülerinin boyutları 227x227x3 pikseldir. Algoritmada yığın boyutu 32 olarak seçilmiştir.

Ham veriler CNN modeline uygulanarak görüntüdeki öznelikler elde edilmiş, ardından çok sınıflı Destek Vektör Makineleri ile sınıflandırılmıştır.

##### 4.1. Evrişimsel Sinir Ağları

2012 yılında G. Hinton ve Alex Krizhevsky, günümüzde "AlexNet" olarak bilinen derin ağ yapısını ortaya atmış, sekiz katmanlı bir evrişimsel sinir ağı eğitmiştir [33]. Bu ağ yapısının getirdiği başarının ardından CNN yapısı özellikle görüntü işlemede en yaygın kullanılan derin ağ çeşitlerinden biri olmuştur.

Basit bir CNN modeli aşağıdaki katmanlardan oluşur.

4.1.1. Evrişim Katmanı (Konvolüsyon Katmanı): Yapıya uygun olarak belirlenmiş bir filtrenin, giriş görüntüsünün pikselleri üzerinde teker teker kaydırılması işlemidir. Kaydırma sırasında filtredeki değerler görüntünün orijinal piksel değerleri ile çarpılarak toplanır ve tek değer halinde yazılır. Bu işlem, tüm girdi görüntüsü boyunca hesaplanır. Yapının ilk katmanı olan evrişim katmanı; görüntüdeki kenar, baloncuk ve eğri gibi düşük seviyeli öznelikleri tespit eder.

4.1.2. Havuzlama (Ortaklama): Bu katmanda genellikle maksimum havuzlama (max pooling) yöntemi kullanılır. Bu katman sayesinde girdi boyutları küçültülerek hesaplama maliyeti azaltılır.

4.1.3. Tam Bağlı Katman: Bu katman, son katman olarak bilinir ve girdi, sınıf sayısı boyutunda bir vektör haline getirilir. Bu katmanda konumlandırılmış bir softmax fonksiyonu ile çıkarılan yüksek seviyeli öznelikler bir sınıf ile bağdaştırılır.

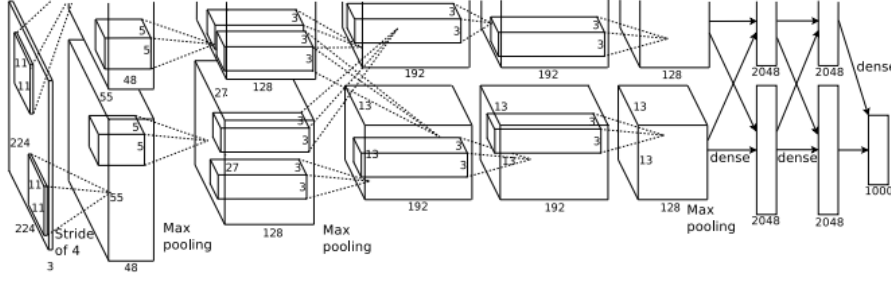
Evrişim ve havuzlama katmanları, ağ içerisinde istenildiği kadar kullanılabilir. Her bir katman sonrası daha yüksek öznelik uzayına geçilir ve en nihayetinde elde edilen özneliklerin sınıflandırılması yapılır. Burada kaç katman kullanılacağı, filtrenin hangi boyutta seçileceği, evrişim aşamasında filtrenin kaç adımda bir kayacağı (stride size) gibi parametrelerin seçimi kullanılan veri setine bağlı olarak değişmektedir.

##### 4.2. Evrişimsel Sinir Ağları Mimarileri

Son yıllarda birbirinden farklı pek çok CNN mimarisinin kullanımına tanık olunmuştur. Bu mimarilerin birbirlerinden temel farkı, derinlikleri ve beraberinde getirdiği parametre sayıdır [34].

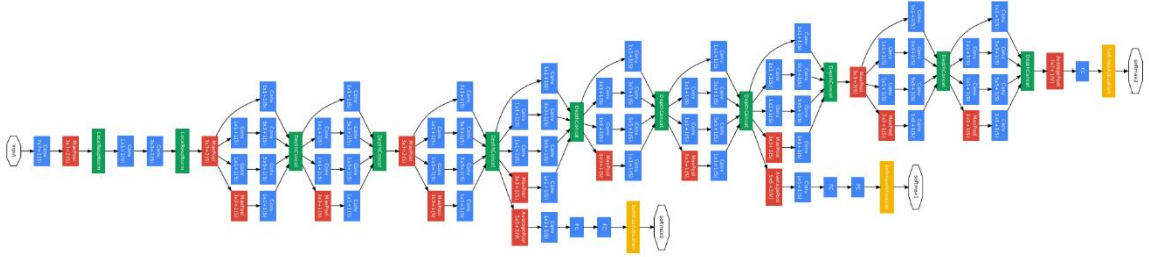
Bu çalışmada, AlexNet, GoogleNet ve VGG-19 mimarileri incelenmiştir.

4.2.1. AlexNet: 2012 yılında gerçekleştirilen ImageNet yarışmasını kazanan bu model, derin öğrenme için bir dönüm noktası olmuştur. Model, 5'i evrişim ve 3'ü tam bağımlı olmak üzere toplamda 8 katmandan oluşmaktadır. Mimaride kullanılan filtreler 11x11 boyutlarında seçilmiştir. Ayrıca model, Rectified Linear Units (ReLU) fonksiyonunu aktivasyon fonksiyonu olarak kullanan ilk derin ağ modelidir. Model, yaklaşık 60 milyon parametreye sahiptir [33]. Mimari yapı, Şekil 3'te gösterilmiştir.



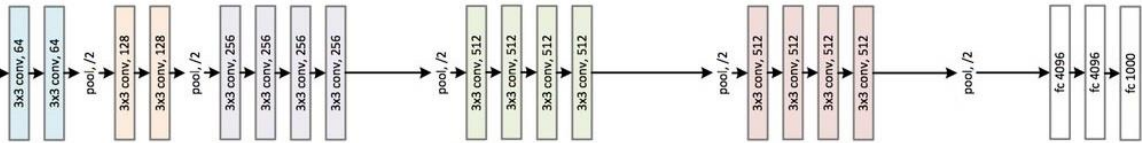
Şekil 3. AlexNet Mimarisi [33].

4.2.2. GoogLeNet: 2014 yılında literatüre kazandırılan bu model, o yılki ImageNet yarışmasını kazanmıştır. Toplamda 22 katmandan oluşan model, AlexNet'e oranla çok daha derin bir yapıya sahiptir. Bu modelde, paralel modüller kullanılarak ezberleme (overfitting) probleminin önüne geçilmeye çalışılmıştır [35]. GoogLeNet ağı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. GoogLeNet Mimarisi [35].

4.2.3. VGG-19: Ağ 16'sı evrişim, 3' tam bağlaşımly olmak üzere toplamda 19 katmandan oluşur. Bu mimaride kullanılan filtreler 3x3 boyutundadır. VGG-19 modeli yaklaşık 144 milyon parametre içermektedir [36]. Mimari yapı, Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. VGG-19 Mimarisi [37].

### 4.3. Destek Vektör Makineleri

Bu makine öğrenme algoritmasının temeli, iki sınıf arasına bir hiper düzlem çizerek verileri ayırma işleme dayanmaktadır [38]. Bu yöntem, daha çok iki sınıftan oluşan verileri sınıflandırmada kullanılmaktadır; ancak çok sınıfa ait problemler için de farklı yaklaşımları bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan en çok kullanılan bire bir yaklaşıma göre, tüm sınıflar önce ikili gruplar halinde SVM ile eğitilmektedir. Ardından tüm SVM'ler birbiriyle kıyaslanarak hangi sınıf için en güvenilir sonucun çıktığına bakılmakta ve veri bu sınıfa atanmaktadır [39].

SVM'nin literatürde en başarılı metotlardan biri olarak görülmesi, bu çalışmanın sınıflandırıcısı için tercih sebebi olmuştur [40-42].

## 5. Tartışma ve Deneysel Sonuçlar

Görüntüleri etiketleme işleminin ardından, uygun derin ağ mimarisini seçmek amacıyla en popüler üç mimari ile öğrenme aktarımı gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 2’de özetlenmiştir.

Öğrenme aktarımı, derin öğrenmede en sık başvurulan yöntemdir. Çünkü derin öğrenme modelleri, eğitilmek için çok fazla veri ve bununla beraber de performansı yüksek bir donanım ihtiyacı duyar. Dolayısıyla önceden eğitilmiş bir ağı kullanmak, ağı baştan eğitmeye oranla daha kısa zamanda iyi sonuçların elde edilebileceği bir yöntem olarak karşımıza çıkar [43]. Bu çalışmada da üç farklı eğitilmiş ağ ile sınıflandırma performansı karşılaştırılmak istenmiştir. Sonuçlara göre, en iyi sınıflandırma başarısının yüzde 82, 82’lik başarıyla AlexNet ile yakalandığı görülmektedir. Buna karşın; GoogLeNet ile VGG-19 mimarilerine ait başarıların da AlexNet’den çok farklı olmadığı anlaşılmaktadır. Buradan hareketle öğrenme aktarımı yönteminin, literatürdeki benzer çalışmalar gibi, bu çalışmada kullanılan veri seti için de etkili olduğunu söylenebilir [44]. Çünkü bu üç mimari de öncesinde büyük fotoğraf boyutlarında eğitilmiş ve farklı sınıflar için modelini genelleştirmeyi başarabilmiştir. Ayrıca Tablo 2’deki değerler kıyaslandığında, her ne kadar sonuçlar birbirine yakın olsa da öğrenme modelindeki katman sayısının artırılması sınıflandırma performansını olumsuz etkilemiştir. Bunun sebebi olarak, bir noktadan sonra ağı girdi tarafından gelen öznetelikleri tekrar kullanamayan ağı öğrenme problemi ile karşı karşıya gelmesi şeklinde yorumlanabilir [45]. Ayrıca insandaki uzun kemiklerin sınıflandırılması üzerine yapılan benzer başka bir çalışma için 6 katmanlı bir CNN modeli ile yüksek başarılar elde edildiği tespit edilmiştir [46].

Sınıflandırma performansını daha iyi irdelemek adına, üç model için de oluşturulan karmaşıklık matrislerine Tablo 3’te yer verilmiştir. Bu tabloya göre, femur ve tibia sınıflarına ait görüntülerinin daha belirgin özneteliklere sahip olması sebebiyle daha başarılı bir şekilde sınıflandırıldığı ortaya çıkmaktadır.

**Tablo 2.** Ağ Mimarilerine Göre Sınıflandırma Başarıları

Mimari Yapı	Sınıflandırma Başarısı (%)
AlexNet	82,82
GoogLeNet	80,45
VGG-19	81,75

**Tablo 3.** Ağ Mimarilerine Göre Oluşturulan Karmaşıklık Matrisleri

Mimari Yapı	Karmaşıklık Matrisi				Belirlilik (%)
	188	7	6	10	
AlexNet	188	7	6	10	89,09
	26	167	10	8	79,14
	3	5	164	39	77,72
	5	3	23	180	85,3
<b>Duyarlılık (%)</b>	84,68	91,75	80,78	75,94	82,81 83,28
GoogLeNet	196	5	2	8	92,89
	36	152	2	21	72,03
	6	5	166	34	78,67
	19	10	17	165	78,2
<b>Duyarlılık (%)</b>	76,26	88,37	88,77	72,36	80,44 81,44
VGG-19	184	11	4	12	87,2
	42	152	10	7	72,03
	7	4	174	26	82,46
	8	4	19	180	85,3
<b>Duyarlılık (%)</b>	76,34	88,88	84,05	80	81,74 78,72

Daha yüksek başarılar elde etmek; ağ yapılarının optimize edilmesi ve veri setinin çoğaltılması ile mümkündür [47]. Bu nedenle, kümülatif olarak güncellenen veri seti sayesinde gelecek çalışmalar adına daha çok veri ile performans iyileştirilmesi söz konusu olabilir.

## 6. Sonuç

Çalışmada, üç farklı eğitilmiş ağ ile sınıflandırma performansı ölçülmüş ve en iyi başarının AlexNet ile elde edildiği gözlenmiştir.  mimariye de ait sınıflandırma başarıya bakarak, öğrenme aktarımı yönteminin, çalışmada kullanılan veri seti için uygun olduğunu söylenebilir.

Bu çalışmadaki amaç, bahsedildiği üzere köpeklerdeki uzun kemikleri sınıflandırmaktır. Kemiklerin sınıflandırılmasının ardından, kemiklerdeki kırığın varlığının saptanması ve var olması durumunda da kırığın cinsine göre sınıflandırılması ise gelecek çalışmalar arasında yer almaktadır. Dolayısıyla ncelikli olarak bu çalışmadaki sınıflandırma başarisının yükseltilerek, kırıkların tespit edilmesi daha güvenilir sonuçlar ortaya çıkaracaktır.

## Teşekkür

Çalışmamıza önemli katkıda bulunan ve bulunmaya devam eden Ankara Büyükşehir Belediyesi Sokak Hayvanları Geçici Bakım Evi çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

## Kaynaklar

- [1] A. şeker, B. Diri, H. Hüseyin Balık, "Derin ğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme," Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 3, pp. 47-64, 2017.
- [2] A. Prasoon, K. Petersen, C. Igel, F. Lauze, E. Dam, M. Nielsen, "Deep Feature Learning for Knee Cartilage Segmentation Using a Triplanar Convolutional Neural Network," MICCAI, pp. 246–253, 2013.
- [3] Sergio, P., Adriano, P., Carlos, A., "Brain Tumor Segmentation using Convolutional Neural Networks in MRI Images" IEEE Transactions on Medical Imaging, pp. 1240-1251, 2016.
- [4] G. Urban, M. Bendszus, F. A. Hamprecht, J. Kleesiek, "Multi-modal Brain Tumor Segmentation using Deep Convolutional Neural Networks," MICCAI BraTS Challenge Proceedings, pp. 31–35, 2014.
- [5] Adams M, Chen W, Holcdorf D, McCusker M W, Howe P D, Gaillard F., "Computer vs human: deep learning versus perceptual training for the detection of neck of femur fractures," J Med Imaging Radiat Oncol; vol.63, pp. 27–32, 2019.
- [6] Brett A, Miller C G, Hayes C W, Krasnow J, Ozanian T, Abrams K, Block J E, van Kuijk C., "Development of a clinical workflow tool to enhance the detection of vertebral fractures: accuracy and precision evaluation," Spine, vol. 34, pp. 2437–2443, 2009.
- [7] Chung S W, Han S S, Lee J W, Oh K S, Kim N R, Yoon J P, Kim J Y, Moon S H, Kwon J, Lee H J, Noh Y M, Kim Y., "Automated detection and classification of the proximal humerus fracture by using deep learning algorithm," Acta Orthop, vol. 89, pp. 468–473, 2018.
- [8] Szegedy C, Vanhoucke V, Loffe S., "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, pp. 2818-2826, 2016.
- [9] Lindsey R, Daluiski A, Chopra S, Lachapelle A, Mozer M, Sicular S, Hanel D, Gardner M, Gupta A, Hotchkiss R, Potter H., "Deep neural network improves fracture detection by clinicians," Proc Natl Acad Sci USA, vol. 115 pp. 11591–11596, 2018.
- [10] Najafabadi, M.M., Villanustre, F., Khoshgoftaar, T.M. et al. Deep learning applications and challenges in big data analytics. Journal of Big Data 2, 1, 2015.
- [11] J. Seetha, S.S. Raja, "Brain Tumor Classification Using Convolutional Neural Networks," Biomed Pharmacol J, vol. 11, 2018.
- [12] Zbigniew A. Starosolski, J. Herman Kan, and Ananth Annapragada "CNN-based detection of distal tibial fractures in radiographic images in the setting of open growth plates", Proc. SPIE 11314, Medical Imaging 2020: Computer-Aided Diagnosis, 2020.
- [13] YK Ulusal Tez Merkezi, "<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>," erişim: 15.45, 11.10.2020.
- [14] O. Yıldız, "Derin ğrenme yöntemleriyle dermoskopi görüntülerinden melanom tespiti: Kapsamlı bir alışma," Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 34, pp. 2241-2260, 2019.
- [15] B. Harangi, "Skin lesion classification with ensembles of deep convolutional neural networks," J Biomed Inform.vol. 86, pp. 25-32, 2018.
- [16] A. Esteva, B. Kuprel, R.A. Novoa, J. Ko, S.M. Swetter, H.M. Blau, and S. Thrun, "Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks," Nature, vol. 542, 2017.
- [17] M. Siar and M. Teshnehlab, "Brain Tumor Detection Using Deep Neural Network and Machine Learning Algorithm," 9th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), Mashhad, Iran, pp. 363-368, 2019.
- [18] S. Khawaldeh, U. Pervaiz, A. Rafiq, R. S. Alkhaldeh, "Noninvasive Grading of Glioma Tumor Using Magnetic Resonance Imaging with Convolutional Neural Networks," Appl. Sci., vol. 8, 2018.

- [19] A. Le Berre, K. Kamagata, Y. Otsuka, et al. "Convolutional neural network-based segmentation can help in assessing the substantia nigra in neuromelanin MRI," *Neuroradiology*, vol. 61, pp. 1387-1395, 2019.
- [20] Couteaux V, Si-Mohamed S, Nempont O, et al. "Automatic knee meniscus tear detection and orientation classification with Mask-RCNN," *Diagn Interv Imaging*, vol. 100, pp. 235-242, 2019.
- [21] M. Gopalakrishnan, J. Sheng, M. Valesani, "Automated Detection of Breaks and Fractures in X-Ray Bone Images," 2019.
- [22] Johannes Kvam, Lars Erik Gangsei, Jørgen Kongsro, Anne H Schistad Solberg, "The use of deep learning to automate the segmentation of the skeleton from CT volumes of pigs," *Translational Animal Science*, vol. 2, pp. 324–335, 2018.
- [23] C. Chin, Y. Lin and Y. Liu, "Various Types Fracture Labeling in Bone Radiographs Using Modified AC-GAN," 2019 International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI), Kaohsiung, Taiwan, pp. 1-6, 2019.
- [24] A. Yi Yang, I. Cheng, "Long-Bone Fracture Detection Using Artificial Neural Networks Based on Contour Features of X-ray Images," 2019.
- [25] S. Beyaz, Salih, K. Açıcı, E. Sümer, "Derin Öğrenme ve Genetik Algoritma Yaklaşımları Kullanılarak X-Ray Görüntülerinde Femur Kırığı Tespiti," *Uluslararası Sağlıkta Yapay Zeka Kongresi, İzmir, Türkiye*, 2020.
- [26] F. Liu, Z. Zhou, H. Jang, A. Samsonov, G. Zhao, R. Kijowski, "Deep convolutional neural network and 3D deformable approach for tissue segmentation in musculoskeletal magnetic resonance imaging," *Magnetic Resonance in Medicine*, 2017.
- [27] Wang et al., "Skeletal Maturity Recognition Using a Fully Automated System with Convolutional Neural Networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29979-29993, 2018.
- [28] D. H Kim, T. MacKinnon, "Artificial intelligence in fracture detection: Transfer learning from deep convolutional neural networks," *Clin. Radiol.*, vol. 73, pp. 439–445, 2018.
- [29] Y. Chen, "Classification of Atypical Femur Fracture with Deep Neural Networks," KTH University: Stockholm Sweden, 2019.
- [30] Dargan, S., Kumar, M., Ayyagari, M.R. et al. "A Survey of Deep Learning and Its Applications: A New Paradigm to Machine Learning," *Arch Computat Methods Eng.*, vol. 27, pp. 1071–1092, 2020.
- [31] Stock Medical and Veterinary Illustrations, "drawing of dog skeletal system," [http://yesko.com/medical\\_illustrations/stock-illustration-dog-anatomy-01.htm](http://yesko.com/medical_illustrations/stock-illustration-dog-anatomy-01.htm), erişim: 19.01, 19.10.2020.
- [32] Yamashita, R., Nishio, M., Do, R.K.G. et al. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights Imaging*, vol. 9, pp. 611–629, 2018.
- [33] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. Hinton, "ImageNet classification with deep convolutional neural networks," NIPS'2012, 2012.
- [34] Ö. İnik, E. Ülker, "Derin Öğrenme ve Görüntü Analizinde Kullanılan Derin Öğrenme Modelleri," *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi* vol. 6, pp. 85-104, 2017.
- [35] C. Szegedy et al., "Going deeper with convolutions," 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, pp. 1-9, 2015.
- [36] K. Simonyan, A. Zisserman, "Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition," conference paper at ICLR 2015.
- [37] Ahmed Abdelbaki, "P-CNN features for Action Recognition," *Computer Vision Lab SS16*, 2016.
- [38] Cortes, C., and Vapnik, V. "Support-vector networks. *Machine Learning*," vol. 20, pp. 273–297, 1995.
- [39] Çok sınıflı DVM (Multiclass SVM), <http://bilgisayarkavramlari.sadievrenseker.com/2008/12/01/cok-sinifli-dvm-multiclass-svm/>, erişim: 19.51, 19.10.2020.
- [40] A. Tekerek, "Support Vector Machine Based Spam SMS Detection," *Journal of Polytechnic*, vol. 22, pp.779-784, 2019.
- [41] Padmavathi Janardhanan, Heena L., and Fathima Sabika, "Effectiveness of Support Vector Machines in Medical Data mining," *Journal of Communications Software and Systems*, vol. 11, 2015.
- [42] A. Yahiaoui, O. Er, N. Yumusak, "A new method of automatic recognition for tuberculosis disease diagnosis using support vector machines," *Biomedical Research*, vol. 28, 2017.
- [43] L. Torrey and J. Shavlik, "Transfer Learning," *Handbook of Research on Machine Learning Applications*, IGI Global, 2009.
- [44] N. Tajbakhsh et al., "Convolutional Neural Networks for Medical Image Analysis: Full Training or Fine Tuning," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 35, 2016.
- [45] S. Zagoruyko, N. Komodakis, "Wide Residual Networks," 2017.
- [46] Nitesh Pradhan et al., "Classification of Human Bones Using Deep Convolutional Neural Network," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019.
- [47] C. Shorten, T.M. Khoshgoftaar, "A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning," *J Big Data* 6, 60, 2019.

## Sabit Zaman Gecikmeli Tek Serbestlik Dereceli Bir Haptik-Teleoperasyon Sisteminin Kontrolü

Tayfun ABUT<sup>1\*</sup>, Servet SOYGÜDER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, Türkiye

<sup>2</sup> Endüstri Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye

\*<sup>1</sup> tayfunabut@gmail.com, <sup>2</sup> servetsoyguder@gmail.com

(Geliş/Received: 30/06/2020;

Kabul/Accepted: 25/10/2020)

**Öz:** Haptik-teleoperasyon sistemlerinin performansının artırılması amacıyla çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Haptik-teleoperasyon sistemlerinde iki temel unsur hedeflenmektedir. Birinci kararlılık(stability) ikincisi ise şeffaflık(transparency)'tir. Özellikle kararlılığı, şeffaflığı bozan ve performansı etkileyen en önemli problemlerden biri zaman gecikmesidir. Zaman gecikmesi haptik teleoperasyon sistemlerinin performansını oldukça kötü etkilemektedir. Bu çalışmada tek serbestlik dereceli robotlardan oluşan haptik-teleoperasyon sisteminin sabit zaman gecikmeli kontrolü hedeflenmiştir. Öncelikle sistemi oluşturan robotların hareket denklemleri elde edilmiştir. Dalga değişken yöntemi(Wave Variables Method) kullanılarak sabit zaman gecikmesi telafi edilmiştir.200,400 ve 800 milisaniye zaman gecikmesinin varlığında sistem kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki farklı performans kriterleri (MAE ve MSE) kullanılarak elde edilmiş ve tablolar şeklinde verilmiştir. Sonuçlar grafikler ve tablolar şeklinde verilmiş ve irdelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Haptik-Teleoperasyon, Tek Serbestlik Dereceli Robot, Sabit Zaman Gecikmesi, Dalga Değişken Yöntemi

### Control of a Single Degree of Freedom Haptic-Teleoperation System with Constant Time Delay

**Abstract:** Various studies are carried out to increase the performance of haptic-teleoperation systems. Two main elements are targeted in haptic-teleoperation systems. The first is stability, and the second is transparency. Especially one of the most important problems that affect stability, transparency, and affect performance is the time delay. Time delay affects the performance of haptic teleoperation systems very badly. In this study, it is aimed to control the haptic-teleoperation system consisting of single degree of freedom robots with constant time delay. First of all, the motion equations of the system were obtained. A constant time delay was compensated by using the Wave Variables Method. The system has been checked in the presence of 200, 400, and 800 millisecond time delay. The results obtained were obtained using two different performance criteria (MAE and MSE) and have been presented in tables. The results have been given in the form of graphs and tables and were examined.

**Key words:** Haptic-Teleoperation, Single Degree of Freedom Robot, Constant Time Delay, Wave Variable Method

### 1. Giriş

Haptik-teleoperasyon sistemleri kullanım alanlarının geniş bir yelpazede olmasından ötürü birçok alanda aktif olarak araştırılmaktadır. Bunlardan bazıları savunma endüstrisinden, robotik cerrahiye ve simülasyonlara vb. alanlardır [1-5]. Teleoperasyon çalışmalarında iletişim kanalında meydana gelen zaman gecikmesi sistemin kontrolünde büyük problemlere neden olmaktadır. Çünkü bu zaman gecikmesi sistemi kararsız ve kontrol edilemeyecek bir hale getirmektedirler. Literatürde bu problemi çözmek için çeşitli yöntemler önerilmiş ve uygulanmıştır. Ferrel tek serbestlik dereceli sistemde zaman gecikmesinin düşük miktarının bile sistemde kararsızlığa yol açtığını göstermiş ve bu durumlarda da görevin tamamlanması için yeterince kararlı kalması gerektiği sonucuna varmıştır [6]. Zaman gecikmesi problemi haptik-teleoperasyon sistemlerini kararsız bir duruma getirmektedir. Bu konuda Anderson ve Spong tarafından yapılan çalışmada iletişim kanalının pasif(passivity) olmayan yapısından dolayı kararsızlaştığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca yaptıkları çalışmada pasiflik tabanlı Scattering dönüşümünü sabit zaman gecikmeleri için önermişlerdir[7]. Niemeyer ve Slotine, Scattering dönüşümünü geliştirerek dalga değişken yöntemini önermiştir. Niemeyer ve Slotine, iletişim kanalının giriş ve çıkışlarına yeni değişkenler tanımlamıştır. Hız ve kuvvet gibi geleneksel güç değişkenleri yerine dalga değişkenleri önermiştir. Hız ve kuvvet sinyallerine iletişim kanalı öncesinde bu dalga değişkenleri dönüşümü uygulanarak sinyaller dalga değişkenlerine dönüştürülmüştür. Scattering teorisindeki sonucun aynısına dalga teorisine de

\* Sorumlu yazar: [tayfunabut@gmail.com](mailto:tayfunabut@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4646-3345, <sup>2</sup> 0000-0002-8191-6891



ulaşmıştır[8]. Munir ve Book pozisyon sapması problemi için kalman filtresi tabanlı bir yöntem üzerine çalışmıştır[9]. Dalga değişken yöntemi yaklaşımı kullanılarak pozisyon sapması problemini azaltmak için Chopra ve diğerleri klasik dalga değişkenine bir döngü eklemiştir[10]. Hirche ve diğerleri iki yönlü zaman gecikmesi probleminin çözümünde en başarılı yöntemlerden biri olduğunu ifade etmişlerdir[11]. Diolaiti ve diğerleri dalga değişken yöntemini kullanarak daha fazla rijitlik elde etmek için motor akımı ve voltajıyla doğrudan etkileşime girmişlerdir [12].Veri kaybı ve değişken zaman gecikme varlığında Rodriguez-Seda ve diğerleri dalga tabanlı pasifliği sağlamak için sönüm ekleme tipinde ve pozisyon hatalarının da göz önüne alındığı bir yaklaşımla deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir[13]. Benedetti ve diğerleri empedans eşleştirme yaklaşımında karalı durum hatası olmasına rağmen geçici salınımları yok etmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir[14]. Aziminejad ve diğerleri ana ve bağımlı robot taraflarında kuvvet sensörü kullanılmasının şeffaflığı önemi ölçüde artırdığını göstermiştir[15]. Bate ve diğerleri geriye doğru hız bilgisini kaldırarak dalga yansımalarını azaltmak için bir çalışma yapmışlardır[16]. Zaman gecikmesi varlığında telerobotik sistemler için dalga değişken yöntemine geri-sürülebilirliği üzerine deneysel çalışma ile etkileri Li ve Kawashima tarafından araştırılmıştır[17]. Soyguder ve Abut yaptıkları çalışmada değişken zaman gecikmesi varlığında modifiye edilmiş dalga değişken yöntemini kullanarak kararlı bir pozisyon performansı elde etmek için bir kontrol yöntemi önermiştir[18]. Zaman gecikmeleri altında dört kanallı doğrusal olmayan iki taraflı teleoperasyon sisteminin pasiflik ve dalga değişken tabanlı kontrol gerçekleştirilmiştir[19]. Dinamik belirsizlikleri ve zaman gecikmelerinin etkisini azaltmak için dalga değişkenli radyal tabanlı sinir ağları (RBFNN) kontrol yöntemi kullanılmıştır[20].Birçok araştırmacı tarafından dalga değişken yöntemi araştırılmış, geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam ettirilmiştir[21-23]. Şekil 1'de iki yönlü teleoperasyon sisteminin genel görünümü gösterilmiştir.



Şekil 1. İki yönlü(bilateral) teleoperasyon sisteminin genel görünümü

Bu çalışmada haptik-teleoperasyon sistemlerinin kararlılığı, şeffaflığı bozan ve performansı etkileyen en önemli problemlerden biri zaman gecikmesi problemi giderilmeye çalışılmıştır. Tek serbestlik dereceli robotlardan oluşan haptik-teleoperasyon sisteminin sabit zaman gecikmesi varlığında kontrolü hedeflenmiştir. Öncelikle sistemi oluşturan robotların hareket denklemleri elde edilmiştir. Dalga değişken yöntemi(Wave Variables Method) kullanılarak sabit zaman gecikmesi telafi edilmiştir.200,400 ve 800 milisaniye zaman gecikmesinin varlığında sistem kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki farklı performans kriteri(MAE ve MSE) kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar grafikler ve tablolar şeklinde verilmiştir ve irdelenmiştir.

## 2. Sistemin Modellenmesi

Haptik-teleoperasyon sisteminin hareket denklemleri Lagrange-Euler yöntemi ile elde edilmiştir. Sistemi oluşturan robotlar tek serbestlik derecesine sahiptir. Ana (master) ve bağımlı (slave) robotlardan oluşan sistemin hareket denklemleri 1 ve 2 nolu denklemlerde verilmiştir.

$$I_m \ddot{q}_m + b_m \dot{q}_m = f_h + \tau_m \quad (1)$$

$$I_s \ddot{q}_s + b_s \dot{q}_s = \tau_s - f_e \quad (2)$$

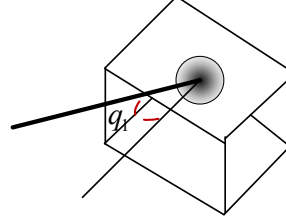
Konum, hız, ivme ve tork ifadeleri sırasıyla  $\dot{q}_i, \ddot{q}_i, q_i$  ve  $\tau_i$  gösterilmiştir. Ana ve bağımlı robotları  $i \in \{m, s\}$  indisleri göstermektedir. Sisteme ait atalet momentleri  $I_m$  ve  $I_s$ , sönüm katsayılarını  $b_m$  ve  $b_s$  göstermektedir. Ana ve bağımlı robotların tork ifadelerini  $\tau_m$  ve  $\tau_s$  göstermektedir. Kullanıcı tarafından uygulanan ve çevreden sisteme etki eden bozucu tork ifadelerini  $\tau_h$  ve  $\tau_e$  göstermektedir. Ana ve bağımlı robotların çevre ile etkileşim modelleri yay-damper şeklinde modellenmiştir.

$$\tau_h = J_m^T f_h, \tau_e = J_s^T f_e \quad (3)$$

$$f_h = k_h \Delta_h + b_h \dot{\Delta}_h, \Delta_h = z_m - z_s \quad (4)$$

$$f_e = k_e \Delta_e + b_e \dot{\Delta}_e, \Delta_e = z_r - z \quad (5)$$

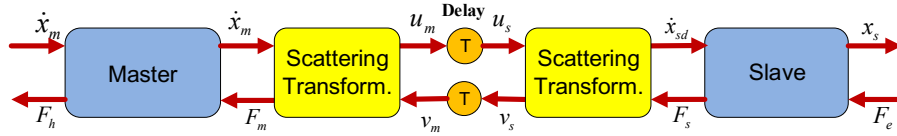
Yukarıda verilen denklemlerden  $f_e$  ve  $f_s$  temas sırasında meydana gelen insan ve çevre kuvvetlerini göstermektedir. Yay sabitleri  $k_h$  ve  $k_e$ , sönüm katsayılarını  $b_h$  ve  $b_e$  göstermektedir. Sistemi oluşturan robotlardan bir tanesinin modeli Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Sistemi oluşturan robotlardan bir tanesinin modeli

### 3. Dalga Değişkenleri Yöntemi(Wave-Variables Method)

Dalga değişkenleri (wave variables) yöntemi, Scattering teorisi geliştirilerek bulunmuştur[8]. Niemeyer ve Slotine, iletişim kanalının giriş ve çıkışlarına yeni değişkenler tanımlamışlardır. Hız ve kuvvet gibi geleneksel güç değişkenleri yerine dalga değişkenleri önermişlerdir. Hız ve kuvvet sinyallerine iletişim kanalı öncesinde bu dalga değişkenleri dönüşümü uygulanarak sinyaller dalga değişkenlerine dönüştürülmüştür. Standart sabit zaman gecikmeli Scattering dönüşümüne ait blok diyagramı Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Standart sabit zaman gecikmeli Scattering dönüşümü

İletişim kanalının her iki tarafındaki giriş ve çıkışları güç akışına dalga değişkenleri uygulanarak giriş ve çıkış dalgaları olarak adlandırılmaktadır. Güç sinyalleri olan hız ve kuvvet sinyalleri dalga değişkenlerine dönüştürülmektedir. Standart güç değişkenlerinden aşağıdaki dönüşümlerle dalga değişkenleri elde edilmektedir.

$$u_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_m + F_m); u_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_s + F_s) \quad (6)$$

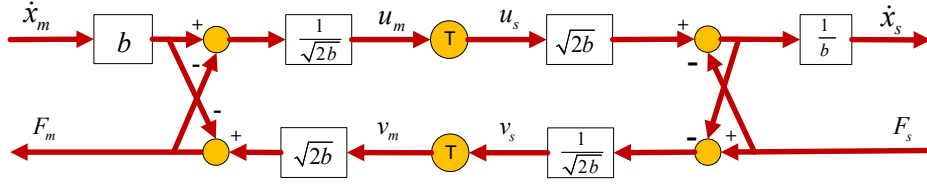
$$v_m = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_m - F_m); v_s = \frac{1}{\sqrt{2b}} (b\dot{x}_s - F_s) \quad (7)$$

Dalga empedansı olarak adlandırılan  $b$  pozitif sabit bir sayıyı veya simetrik olan bir pozitif matrisi göstermektedir. Ana ve bağımlı robotların hızları  $\dot{x}_m$  ve  $\dot{x}_s$ , ana ve bağımlı robotların kuvvetleri  $F_m$  ve  $F_s$ , insan operatör ve etkileşim sonucu elde edilen kuvvet  $F_h$  ve  $F_e$  ile gösterilmiştir. Dalga değişkenleri  $u$  ve  $v$  gösterilmektedir. Bir sistemin pasiflik(passivity) tabanında bakılması için öncelikle sistemin gücünü formüle edilmesi gerekmektedir. Güç ( $P_{in}$ ), sisteme giren ( $x$ ) ve çıkan ( $y$ ) vektörlerin skaler çarpımı şeklinde formüle edilmiştir. Bu formülü sağlayan tüm sistemler pasiftir. Sistemdeki güç ya depolanmış ya da harcanmıştır. Aşağıda verilen formüle göre  $t$  anına kadar bir sistem tarafından üretilen toplam enerji ilk depolanan enerjiyle sınırlı olduğu ifade edilebilir, bir başka söylemle enerji dönüşümü negatif ilk enerjiyle sınırlıdır:

$$\int_0^t P_{in}(t) dt = \int_0^t x^t y dt \geq E_{store}(t) - E_{store}(0) \quad (8)$$

Zamanla depolanan enerji  $E_{store}(t)$ , ilk depolanan enerji ise  $E_{store}(0)$  ile tanımlanmıştır. Sistem çalışırken herhangi bir anda iletişim bloğu içerisinde güç girişi aşağıdaki formülle gösterilmektedir. Dalga değişken dönüşüm blok diyagramı Şekil 4’de verilmiştir.

$$P_{in}(t) = \dot{x}_{md}(t)F_m(t) - \dot{x}_{sd}(t)F_s(t) \quad (9)$$



Şekil 4. Dalga değişken dönüşüm yöntemi blok diyagramı

İletişim kanalında  $T$  kadar sabit bir zaman gecikmesi maruz kaldığında, gidiş ve dönüşte iletilen sinyaller aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u_s(t) = u_{md}(t) = u_m(t - T) \quad (10)$$

$$v_m(t) = v_{sd}(t) = v_s(t - T) \quad (11)$$

8 nolu denklemin içerisine elde edilen 10 ve 11 nolu denklemler yazılığında başlangıç enerjisi varsayılarak ana ve bağımlı robotlar arasında iletişim esnasında depolanan toplam enerji miktarı 12 nolu denklem ile elde edilmektedir. 12 nolu denklem incelediğinde kayıpsız ve pasif bir iletişim kanalı elde edilmiştir ve pasiflik özelliğinin zaman gecikmesi miktarından tamamen bağımsız olduğu görülmüştür.

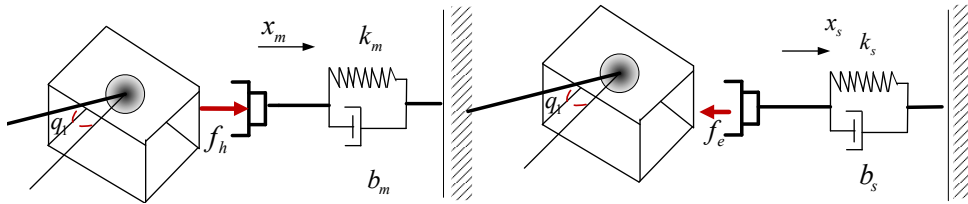
$$E = \int_0^t P_{in}(\tau) d\tau = \int_0^t (\dot{x}_{md}(\tau)F_m(\tau) - \dot{x}_{sd}(\tau)F_s(\tau))d\tau$$

$$E = \frac{1}{2} \int_0^t u_m^T(\tau)u_m(\tau) - v_m^T(\tau)v_m(\tau) + v_s^T(\tau)v_s(\tau) - u_s^T(\tau)u_s(\tau)d\tau$$

$$E = \frac{1}{2} \int_0^t (u_m^T(\tau)u_m(\tau) + v_s^T(\tau)v_s(\tau))d\tau \geq 0 \quad (12)$$

#### 4. Sayısal Benzetim (Numerical Simulation) Sonuçları

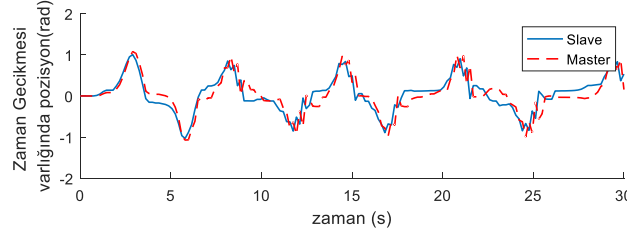
Sistemin hareket denklemleri ve dalga değişken yöntemi kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Konum, hız ve kuvvet kontrol parametreleridir. Tek serbestlik dereceli robotlardan oluşan haptik-teleoperasyon çok serbestlik dereceli robotlar ile gerçekleştirilen çalışmalar için oldukça önemli bir temel oluşturmaktadır. Şekil 5' te ana ve bağımlı robottan oluşan haptik-teleoperasyon sisteminin modeli verilmiştir.



Şekil 5. Ana(master) ve bağımlı(slave) robotların çevre ile etkileşiminin benzetim modeli

Çalışmada ilk aşama olarak sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. İkinci olarak bu denklemler benzetim ortamında çalışır hale getirilmiştir. Sistemde ana robot tarafında üretilen pozisyon veya hız bilgisinin bağımlı robot tarafından maksimum oranda takip edilmesi, benzer şekilde bağımlı robot tarafından etkileşim sonucu elde edilen kuvvet veya tork bilgilerinin maksimum oranda ana robot tarafında hissedilmesi hedeflenmiştir. Öncelikle elde edilen denklemler kullanılarak sistemin zaman gecikmesiz bir şekilde kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ana ve bağımlı robotların fiziksel parametreleri  $m_m=m_s=0.038kg$ ,  $l_m=l_s=0.1525m$  ve  $I_m=I_s=0.01 kg\cdot m^2$  şeklinde alınmıştır. İnsan ve çevre modellerinin yay katsayıları  $k_h=k_e=10 N/m$  ve sönüm katsayıları  $b_h$  and  $b_e=2 Ns/m$ 'dir.

Ayrıca insan ve çevre tork değerleri elde edilirken başlangıç şartı yani  $z_0=0$  alınmıştır. Ardından sisteme 200 milisaniye(ms) sabit zaman gecikmesi eklenerek Şekil 6'da verilen grafik elde edilmiştir. Grafikte de görüldüğü üzere sistemin pozisyon takibinde performans düşüklüğüne sebep olmaktadır.



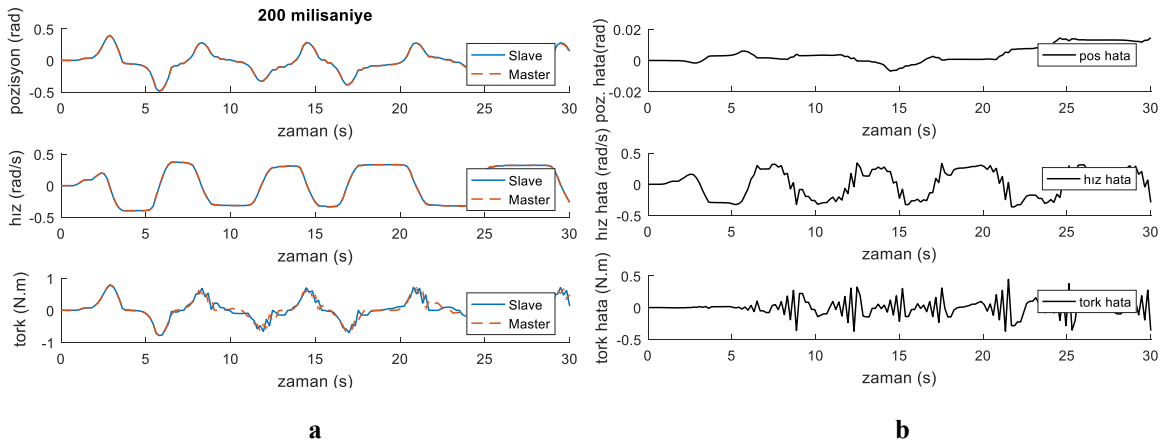
Şekil 6. Zaman gecikmesi varlığında elde edilen robot pozisyon açısı

Sisteme sırasıyla 200,400 ve 800 milisaniye(ms) sabit zaman gecikmeleri eklenmiştir. Sistemin çalışma süresi 30 saniye olarak alınmıştır. Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error (MAE)) ve Ortalama karesel hata (Mean Square Error (MSE)) performans kriterleri kullanılarak yöntemin sonuçları tablolar halinde verilmiş ve irdelenmiştir.

$$MSE = \frac{1}{N} (\sum_j^N y_{m_j} - y_{s_j})^2 \quad (13)$$

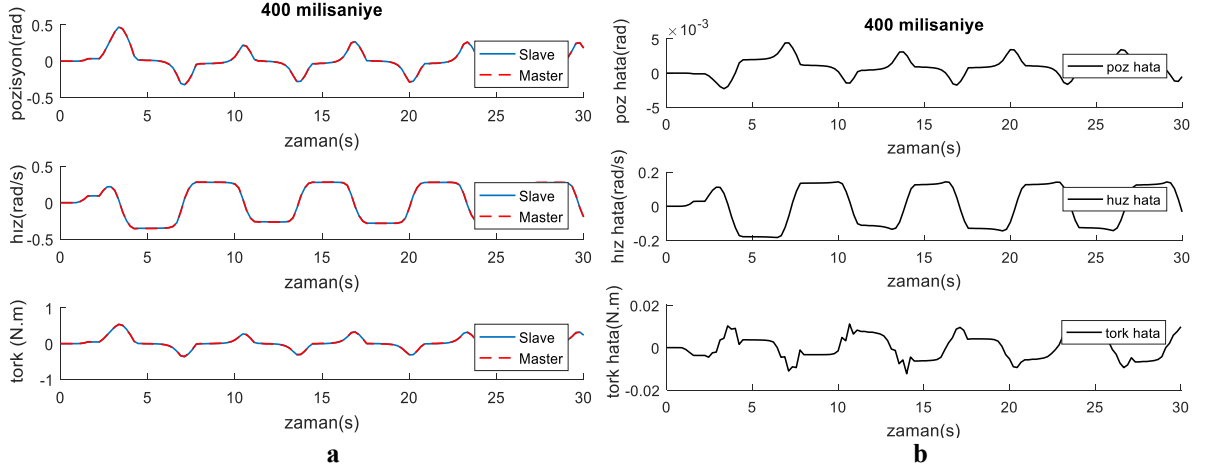
$$MAE = \frac{1}{N} (\sum_j^N |y_{m_j} - y_{s_j}|) \quad (14)$$

$y_{m_j}$  ana robotun  $j$ . değeri  $y_{s_j}$  ise bağımlı robotun  $j$ . değerini göstermektedir.  $y$  ise açı veya tork( $\theta$ & $\tau$ ) ifadesini temsil etmektedir.  $j=1,2,3,4\dots N$ 'dir. Ayrıca bu kısımda dalga değişken yönteminin performans değerleri grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 7-a'da 200 ms zaman gecikmesi varlığında ana (master) ve bağımlı (slave) robotların sırasıyla pozisyon, hız ve kuvvet grafikleri, Şekil 7-b'de ise bu parametrelerin hata grafikleri verilmiştir. Şekil 8-a'da 400 ms zaman gecikmesi varlığında ana (master) ve bağımlı (slave) robotların sırasıyla pozisyon, hız ve kuvvet grafikleri, Şekil 8-b'de ise bu parametrelerin hata grafikleri verilmiştir. Şekil 9-a'da 800 ms zaman gecikmesi varlığında ana (master) ve bağımlı (slave) robotların sırasıyla pozisyon, hız ve kuvvet grafikleri, Şekil 9-b'de ise bu parametrelerin hata grafikleri verilmiştir. 200 ms sabit zaman gecikmesi varlığında elde edilen grafikler gözlemlendiğinde ana robot tarafından gönderilen pozisyon değerinin bağımlı robot tarafına iletiildiği ve hata değerinin  $+0.02\sim-0.02$  değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Hız grafiği göz önüne alındığında ise hızın pozisyon grafiğine göre biraz daha düşük miktarda iletiildiği ve hata değerlerinin  $+0.5\sim-0.5$  değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Tork grafiği incelendiğinde zaman gecikmesinin bağımlı robot tarafında üretilen tork bilgisinin iletilmesini olumsuz yönde etkilediği yaklaşık 8 saniye civarından sonra bir miktar sapma meydana geldiği görülmüştür.  $+0.5\sim-0.5$  aralığında hata değerlerinin değiştiği görülmüştür.

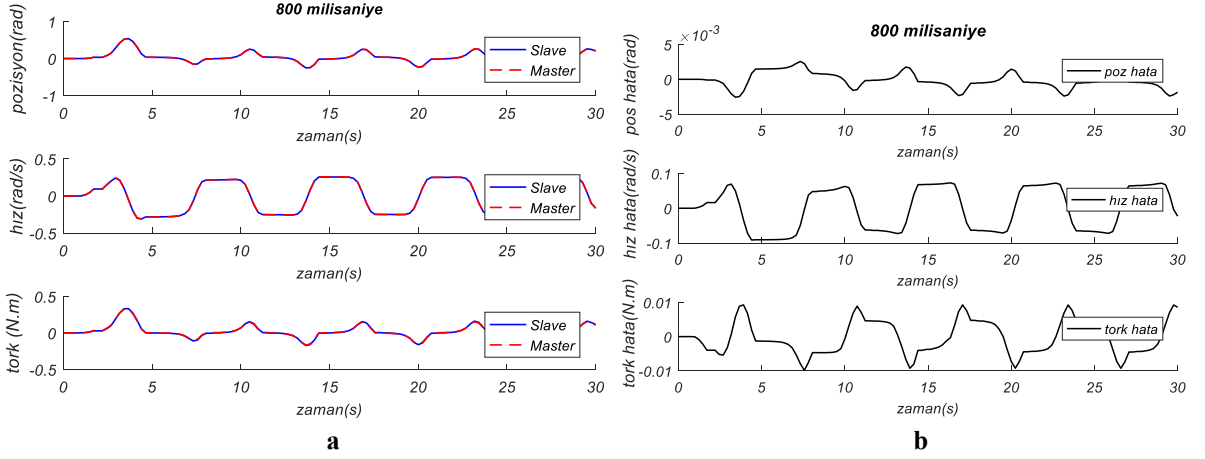


Şekil 7. 200 ms zaman gecikmesi varlığında elde edilen robot eklem açısı

Sabit Zaman Gecikmeli Tek Serbestlik Dereceli Bir Haptik-Teleoperasyon Sisteminin Kontrolü



Şekil 8. 400 ms zaman gecikmesi varlığında elde edilen robot eklem açısı



Şekil 9. 800 ms zaman gecikmesi varlığında elde edilen robot eklem açısı

400 ms sabit zaman gecikmesi varlığında elde edilen grafikler gözlemlendiğinde ana robot tarafından gönderilen pozisyon değerinin bağımlı robot tarafına iletiildiği ve hata değerinin  $+5*10^{-3} \sim -5*10^{-3}$  değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Hız grafiği göz önüne alındığında büyük ölçüde takip ettiği ve hata değerlerinin  $+0.2 \sim -0.2$  değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Tork grafiği incelendiğinde büyük ölçüde  $+0.02 \sim -0.02$  aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. 800 ms sabit zaman gecikmesi varlığında elde edilen grafikler gözlemlendiğinde ana robot tarafından gönderilen pozisyon değerinin bağımlı robot tarafına iletiildiği ve hata değerinin yaklaşık  $+5*10^{-3} \sim -5*10^{-3}$  değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Hız grafiği göz önüne alındığında büyük ölçüde takip ettiği ve hata değerlerinin yaklaşık  $+0.1 \sim -0.1$  değerleri arasında değiştiği görülmüştür. Tork grafiği incelendiğinde büyük ölçüde takip ettiği ve hata performansının yaklaşık  $+0.01 \sim -0.01$  aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Tablo 1 ve 2’de sırasıyla MAE ve MSE kriterlerine göre verilen hata değerleri gösterilmiştir.

Tablo 1. MAE kriterine göre ile elde edilen hata değerleri

Zaman Gecikmesi (milisaniye)	Pozisyon (rad)	Hız (rad/s)	Tork (N.m)
200	0.0034	0.00545	0.0042
400	0.0025	0.01077	0.0048
800	0.0018	0.02027	0.0124

**Tablo 2.** MSE kriterine göre elde edilen hata değerleri

Zaman Gecikmesi (milisaniye)	Pozisyon (rad)	Hız (rad/s)	Tork (N.m)
200	0.00044	0.00036	0.0013
400	0.00034	0.00139	0.0024
800	0.00013	0.00507	0.0098

Tablo 1’de verilen MAE kriterine göre elde edilen sonuçlara göre 200 milisaniye zaman gecikmesi varlığında pozisyon hata değeri 0.0034 radyan olarak elde edilmiştir. Hız ve tork hata değerleri ise sırasıyla 0.00545 rad/s ve 0.0042 N.m olarak elde edilmiştir. 400 milisaniye zaman gecikmesi varlığında pozisyon hata değeri 0.0025 radyan olarak elde edilmiştir. Hız ve tork hata değerleri ise 0.01077 rad/s ve 0.0048 N.m olarak elde edilmiştir. 800 milisaniye zaman gecikmesi varlığında pozisyon hata değeri 0.0018 radyan olarak elde edilmiştir. Hız ve tork hata değerleri ise 0.02027 rad/s ve 0.0189 N.m olarak elde edilmiştir. Tablo 2’de verilen MSE kriterine göre elde edilen sonuçlara göre 200 milisaniye zaman gecikmesi varlığında pozisyon hata değeri 0.00044 radyan olarak elde edilmiştir. Hız ve tork hata değerleri ise sırasıyla 0.00036 rad/s ve 0.0013 N.m olarak elde edilmiştir. 400 milisaniye zaman gecikmesi varlığında pozisyon hata değeri 0.00034 radyan olarak elde edilmiştir. Hız ve tork hata değerleri ise 0.00139 rad/s ve 0.0024 N.m olarak elde edilmiştir. 800 milisaniye zaman gecikmesi varlığında pozisyon hata değeri 0.00013 radyan olarak elde edilmiştir. Hız ve tork hata değerleri ise 0.00507 rad/s ve 0.0098 N.m olarak elde edilmiştir. 200 milisaniye sabit zaman gecikmesi varlığında pozisyon açısı için Tablo 1 ve Tablo 2 karşılaştırılarak incelendiğinde en iyi hata performansı MSE kriterine göre elde edilmiş ve değeri 0.00044’dır. MAE kriterine göre değeri daha büyük bir değer olan 0.0034 radyan olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde hız hata performansı göz önüne alındığında 0.00036 rad/s olarak MSE kriterine göre elde edilmiştir. MAE kriterine göre değeri daha büyük bir değer olan 0.00545 rad/s olarak elde edilmiştir. Tork hata performansına bakıldığında 0.0013 N.m değeri MSE kriterine göre elde edilmiştir. MAE kriterine göre değeri daha büyük bir değer olan 0.0042 N.m’dir. 400 milisaniye sabit zaman gecikmesi varlığında pozisyon açısı için Tablo 1 ve Tablo 2 karşılaştırılarak incelendiğinde en iyi hata performansı MSE kriterine göre elde edilmiş ve değeri 0.00034’dır. MAE değeri ise 0.0025 radyan olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde hız hata performansı göz önüne alındığında 0.00139 rad/s olarak MSE kriterine göre elde edilmiştir. MAE kriterine göre değeri daha büyük bir değer olan 0.01077 rad/s olarak elde edilmiştir. Tork hata performansına bakıldığında 0.0024 N.m değeri MSE kriterine göre elde edilmiştir. MAE kriterine göre değeri daha büyük bir değer olan 0.0048 N.m olarak elde edilmiştir. 800 milisaniye sabit zaman gecikmesi varlığında pozisyon açısı için Tablo 1 ve Tablo 2 karşılaştırılarak incelendiğinde en iyi hata performansı MSE kriterine göre elde edilmiş ve değeri 0.00013 radyandır. MAE kriteri göre değeri daha büyük bir değer olan 0.0018 radyan olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde hız hata performansı göz önüne alındığında 0.00507 rad/s olarak MSE kriterine göre elde edilmiştir. MAE kriterine göre değeri daha büyük bir değer olan 0.02027 rad/s olarak elde edilmiştir. Tork hata performansına bakıldığında 0.0098 N.m değeri MSE kriterine göre elde edilmiştir. MAE kriterine göre değeri daha büyük bir değer olan 0.00124 N.m olarak elde edilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucu farklı sabit zaman gecikmeleri varlığında elde edilen performans sonuçları şekil ve tablolar verilmiştir. Genel olarak en düşük tork ve hız hatası 200 ms’de elde edilmiştir. Ancak en iyi pozisyon hata performansı 800 ms’de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre MSE kriteri değerleri genel olarak bu çalışmada iyi performans göstermiştir.

## 5.Sonuçlar

Bu çalışmada haptik-teleoperasyon sistemlerinin performansı etkileyen en önemli problemlerden biri olan zaman gecikmesi problemi giderilmeye çalışılmıştır. Tek serbestlik dereceli robotlardan oluşan haptik-teleoperasyon sisteminin sabit zaman gecikmesi varlığında kontrolü gerçekleştirilmiştir. 200,400 ve 800 milisaniye sabit zaman gecikmelerinin varlığında sistem kontrol edilmiştir. Dalga değişken yöntemi(Wave Variables Method) kullanılarak sabit zaman gecikmeleri telafi edilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki farklı performans kriterleri (MAE ve MSE) kullanılarak elde edilmiş ve tablolar şeklinde verilmiştir. Tüm sonuçlar grafikler ve tablolar şeklinde verilmiştir ve irdelenmiştir. Genel olarak en düşük tork ve hız hatası 200 ms’de elde edilmiştir. Ancak en iyi pozisyon hata performansı 800 ms’de elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre MSE kriteri değerleri genel

olarak bu çalışmada iyi performans göstermiştir. Benzetim çalışmaları sonucu kabul edilebilir hata performansları elde edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda laboratuvar ortamında uygulaması gerçekleştirilebilir.

## Teşekkür

Bu çalışma Tayfun ABUT 'un doktora tezinden üretilmiştir ve 2211 / C Yurtiçi Öncelikli Doktora Burs Programı kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Zilles CB, Salisbury JK. constraint-based god-object method for haptic display. In: Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human robot interaction and cooperative robots. IEEE, 1995.146-151.
- [2] Abut T, Soyguder S. Interface Design and Performance Analysis for a Haptic Robot. *Mus Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018; 6(2):553-560.
- [3] Black DG, Hosseinabadi AHH, Salcudean SE. 6-DOF Force Sensing for the Master Tool Manipulator of the da Vinci Surgical System. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020; 5(2): 2264-2271.
- [4] Abut T, Soyguder S, Haptic industrial robot control and bilateral teleoperation by using a virtual visual interface. 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, 2018. p. 1-4.
- [5] Lee D, Franch, A, Son HI, Ha C, Bühlhoff HH, Giordano PR. Semiautonomous haptic teleoperation control architecture of multiple unmanned aerial vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013; 18(4):1334-1345.
- [6] Ferrell WR. Delayed force feedback. *Human factors*, 1966; 8(5): 449-455.
- [7] Anderson RJ, Spong MW, Bilateral control of teleoperators with time delay. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989; 34(5):494-501.
- [8] Niemeyer G, Slotine JJE. Stable adaptive teleoperation. *IEEE Journal of oceanic engineering*, 1991; 16(1): 152-162.
- [9] Munir S, Book WJ. Internet based teleoperation using wave variables with prediction. In: 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No. 01TH8556). IEEE, 2001. p. 43-50.
- [10] Chopra N, Spong MW, Ortega R, Barabanov NE On tracking performance in bilateral teleoperation. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006; 22(4):861-866.
- [11] Hirche S, Ferre M, Barrio J, Melchiorri C, Buss M. Bilateral control architectures for telerobotics. In: *Advances in Telerobotics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007. p. 163-176.
- [12] Diolaiti N, Niemeyer G, Tanner NA. Wave haptics: Building stiff controllers from the natural motor dynamics. *The International Journal of Robotics Research*, 2007; 26(1): 5-21.
- [13] Rodriguez-Seda EJ, Lee D, Spong MW. Experimental comparison study of control architectures for bilateral teleoperators. *IEEE Transactions on robotics*, 2009; 25(6):1304-1318.
- [14] Benedetti C, Franchini M, Fiorini P. Stable tracking in variable time-delay teleoperation. In: Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180). IEEE, 2001. p. 2252-2257.
- [15] Aziminejad A, Tavakoli M, Patel RV, Moallem M. Stability and performance in delayed bilateral teleoperation: Theory and experiments. *Control Engineering Practice*, 2008;16(11): 1329-1343.
- [16] Bate L., Cook CD, Li Z. Reducing wave-based teleoperator reflections for unknown environments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009;58(2):392-397.
- [17] Li H, Kawashima K. Experimental comparison of backdrivability for time-delayed telerobotics. *Control Engineering Practice*, 2014; 28:90-96.
- [18] Soyguder S, Abut T. Haptic industrial robot control with variable time delayed bilateral teleoperation. *Industrial Robot: An International Journal*, 2016; 43(4): 390-402.
- [19] Sun D, Naghdy F, Du H. Wave-variable-based passivity control of four-channel nonlinear bilateral teleoperation system under time delays. *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, 2015; 21(1): 238-253.
- [20] Chen Z, Huang F, Sun W, Song W. An improved wave-variable based four-channel control design in bilateral teleoperation system for time-delay compensation. *IEEE Access*, 2018; 6: 12848-12857.
- [21] Guo J, Liu C, Poignet P. A scaled bilateral teleoperation system for robotic-assisted surgery with time delay. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019;95(1): 165-192.
- [22] Abut T, Soyguder S Zaman Gecikmeli İnsan-Makine Etkileşimli Teleoperasyon Sisteminin Kontrolü. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2018; 30(1): 193-202.
- [23] Luo J, Liu C, Wang N, Yang C. A wave variable approach with multiple channel architecture for teleoperated system. *IEEE Access*, 2019; 7: 143912-143920.

## İnsan-İHA Etkileşimi İçin Giyilebilir Eldiven Hareketlerinin Sınıflandırılması ve Analizi

Taha MÜEZZİNOĞLU<sup>1\*</sup>, Mehmet KARAKÖSE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup>Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>1</sup>tmuezzinoglu@firat.edu.tr, <sup>2</sup>mkarakose@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02/07/2020;

Kabul/Accepted: 16/01/2021)

**Öz:** Günlük hayatta kullanılan teknolojilere olan ihtiyaçların artmasıyla birlikte bu teknolojilerden biri olan İnsansız Hava Araçları (İHA) kullanımı da oldukça yaygınlaşmaktadır. İHA'lar üzerindeki teknolojik gelişme ve yenilikler İnsan-İHA etkileşimi konusunu ön plana çıkarmıştır. Bu çalışmada İnsan-İHA etkileşimi ve kontrolü sağlamak için giyilebilir akıllı bir eldiven tasarımı önerilmiştir. Gerçekleştirilen eldiven tasarımının temel yapısında; esneklik sensörleri (İvme Ölçer, Gyro, Pusula ve Yükseklik Sensörü) içeren IMU sensör ünitesi ve Arduino Uno gibi donanımlar kullanılarak el hareketlerini tanıma işlemi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen uygulama çatısı, el hareketlerine karşılık gelen değerlerin hangi eksen yönünde hareket olduğunu tespit etmekte ve hareketlere karşı oluşan sinyallerin tespiti noktasında kolaylık sağlamıştır. El hareketinin tespiti için 20 farklı kişiden örnekler alınarak bir veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan veri seti üzerinden sınıflandırma işlemi yapılarak el hareketi türleri belirlenmiştir. Sınıflandırmanın doğruluk oranı %96,8 olarak tespit edilmiştir. Elde edilen hareket sinyallerinin, Unity ortamında tasarladığımız İHA simülasyonu üzerinden test işlemi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sensörlerden alınan sinyaller ve geliştirdiğimiz uygulama çatısı ile hesaplamalar sonucunda elde edilen hareket verileri gerçek zamanlı olarak İHA simülasyonuna gönderilmiş ve İHA kontrol hareketlerinin, el hareketlerince belirlenen komutlara doğru cevaplar verdiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** İnsan-İHA etkileşimi, Giyilebilir teknolojiler, İnsan-Bilgisayar etkileşimi, Akıllı sistemler.

### Classification and Analysis of Wearable Glove Movements for Human-UAV Interaction

**Abstract:** With the increasing need for technologies used in daily life, the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) is become more commonly. Technological developments and innovations on UAVs brought the subject of Human-UAV interaction to the fore. In this study, a wearable smart glove design is proposed to provide human-UAV interaction and control. In the basic structure of the glove design realized; Hand gestures recognition was performed using hardware such as the IMU sensor unit containing flexibility sensors (Accelerometer, Gyro, Compass and Altitude Sensor) and Arduino Uno. The developed application framework has made it easy to determine the axis direction of the values corresponding to the hand movements and the detection of the signals generated against the movements. For the movement detection, the hand gestures were determined based on the data set created by taking hand gestures from 20 different people. The accuracy rate of the classification was obtained as 96.8%. The motion signals obtained are tested using the UAV simulation we designed in the Unity environment. The data obtained from the sensors and the motion data obtained as a result of the calculations with the framework we developed are sent to the UAV simulation in real-time and it is observed that the UAV control movements responded correctly to the commands received by the hand movements.

**Key words:** Human-UAV interaction, Wearable technologies, Human-Computer interaction, Smart systems.

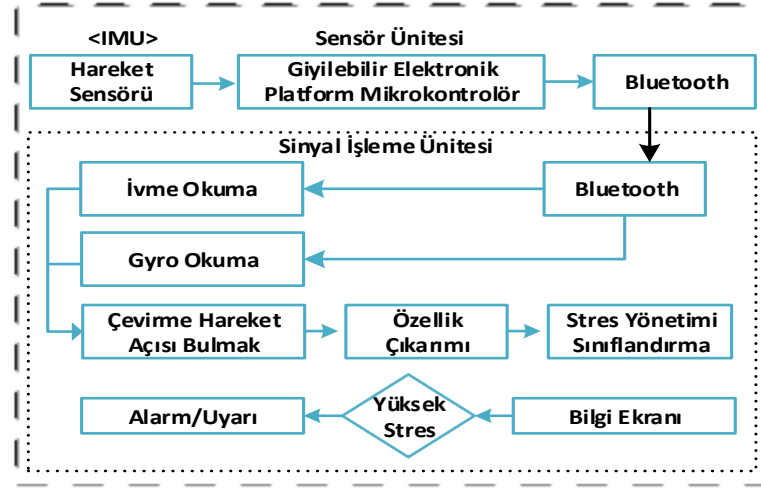
### 1. Giriş

İHA kullanımlarının artmasıyla birlikte İnsan-İHA etkileşimi bazı uygulamalar için sadece bilgi alışveriş için gerekli olsa da insanların veya robotların erişiminin güç olduğu yerlere erişmesi ve görevlerini yerine getirme kabiliyetleri onları eşsiz kılmıştır. Giderek artan ihtiyaçlar İHA'ların basit bir çevre gözetimi işlevinden daha ziyade İnsan-İHA etkileşimine doğru yönelmesini sağlamıştır. İnsanlar için güvenli olmayan ve ulaşımı zor alanlarda gerçekleştirilen çalışmalar insan-İHA etkileşimi sayesinde daha kolay gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada insanlara kullanım kolaylığı sağlamak ve problemlerine çözüm üretmek amacıyla giyilebilir teknolojiler yardımıyla İnsan-İHA etkileşimi konusu ele alınmıştır. Geliştirdiğimiz çalışma İnsan-İHA etkileşimi için giyilebilir akıllı bir eldiven tasarımını ve bu sayede el hareketlerinin sınıflandırılması yoluyla elde edilen verilerin analizini içermektedir. Gerçekleştirilen çalışmanın donanım ve yazılım bileşenleri ile önerilen sistem mimarisi alt bölümlerde detaylıca ele alınmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda, Maher [1], GPS olmayan bir ortamda gerçek zamanlı insan hareketi ile İHA kontrolünü amaçlamıştır. Derin öğrenme ağı kullanılarak kişinin hareketini tespit

\* Sorumlu yazar: [tmuezzinoglu@firat.edu.tr](mailto:tmuezzinoglu@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-4551-3999, <sup>2</sup>0000-0002-3276-3788

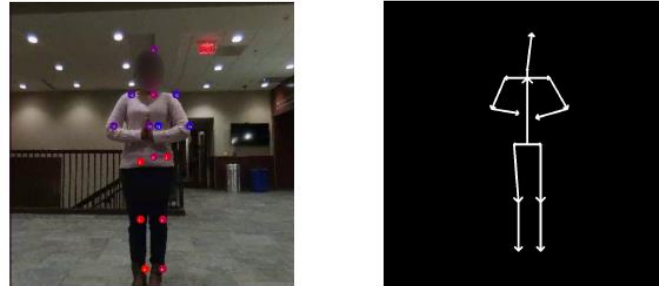


edip anlayabilen gerçek zamanlı güçlü bir İnsan-İHA etkileşimi sistemi geliştirmiştir. Derin sinir ağlarını eğitmek üzere 23 katılımcı ile bir veri seti oluşturmuş ve bu veri setini yorumlamıştır. Bu yorumlara göre insan hareketlerini İHA'ya yön verecek komutlarla eşleştirmiş ve yorumlayıcı bir yaklaşım önermiştir. Lee [2], çalışmasında giyilebilir stres izleme sistemi geliştirmiştir. Gerek günlük yaşantımızda gerekse trafikte artan stresin sürücülerin trafik kazası yapmasına ve yaşam kaybına yol açan en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Literatürde genellikle sinyaller sürücü streslerini ölçmek için en güvenilir araçlar olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada sürücünün stres seviyesini tahmin etmek için direksiyon simidinin hareket şeklini değerlendirecek yeni bir yöntemden bahsedilmiştir. Önerilen giyilebilir eldiven stres izleme sistemi, bir sensör modülü ünitesi ve birde sinyal işleme ünitesi olarak iki bölüme ayrılmıştır. Hareket, bir ivmeölçer, bir jiroskop ve bir manyetometre sensör modülünden oluşan giyilebilir bir eldiven sistemi olarak tasarlanan ataletsel hareket ünitesi (IMU) sensörü kullanılarak kaydedilmiştir. Sürücünün geri bildirimleri ve cildin iletkenliği sürücünün stres seviyesini tespit etmek için referans bir stres olarak kullanılmıştır. Giyilebilir stres izleme sistemi işleyişi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Trafikte Sürücü giyilebilir eldiven stres izleme sistemi [2].

Bolin [3], yaptığı çalışma ile otonom İHA'ların insan hareketlerine dayalı İHA kontrolü sağlayan bir uygulama gerçekleştirmiştir. Harekete dayalı kontrol sağlamak için İHA üzerindeki dâhili kameradan faydalanılarak video analizi yapılmıştır. Bu yaklaşımda analiz yapılmadan poz tahmini için önceden eğitilmiş bir yapay sinir ağı kullanılmıştır. Önerilen yöntemde harekete dayalı kontrolü sağlamak için İnsansız Hava Aracı'nın kamerasından alınan kayıt videosunun akış analizi için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İHA'nın görüş alanı içindeki ilgi alanlarını belirlemek için ve durum çıkarımı için önceden eğitilmiş konvolüsyonel sinir ağı kullanılmıştır. RGB-D plus derinlik sensörlerinin duruş tanıma ve işaret yapabilme özelliği sayesinde bu sensörlerle donatılmış robotlar daha basit bir şekilde görevleri, komutları yerine getirebilmektedir. Ancak İHA'lar bu sensörlerle donatılmadığı için hareket tanıma işlemi yerleşik kamerayla daha karmaşık bir şekilde çözülmektedir. İHA kameralarıyla elde edilen bir RGB görüntüsünden insan modeli çıkarmak için MPII insan duruş veri tabanı tarafından tanımlanan 16 anahtar nokta tespiti yapılır ve İHA'nın komut olarak yorumlayacağı daha önceden belirlenmiş insan duruşlarından birini tanımlamıştır. Örnek duruş Şekil 2'de gösterilmiştir.



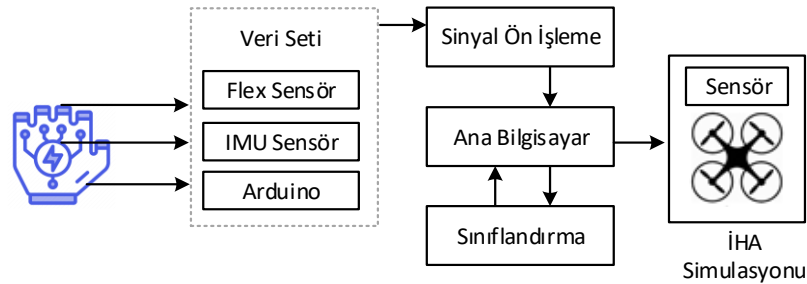
Şekil 2. Konvolüsyon sinir ağı tarafından tanımlanan eklemlerin vektör gösterimi [3].

Wu [4], çalışmasında afet müdahalelerine İnsan-İHA ekipleri tarafından koordine ve acil durumlara müdahale edilmesi gereken bir afet senaryosu üzerinden çoklu İHA yardımı uygulaması gerçekleştirmiştir. Alan belirsizliğini ve kısmi gözlemlenebilirliği yakalamak için bir model önerilmiştir. Bu model için İnsan-İHA etkileşimi algoritması gerçekleştirilmiştir. Evgeny Tsykunov [5,6], çalışmasında insan kollarına bağlı ve ışığa duyarlı 4 adet iniş pedi kullanılarak uçan robot filosunun iniş yapabilmelerini sağlayan akıllı alan sistemi geliştirmiştir. İki çeşit giyilebilir ve dokunsal ekran ile quadcopterlerin altında bulunan ledlerden yayılan ışık sayesinde vibro motorlar çalıştırılmaktadır. Dokunsal sistemde doğru iniş için kullanıcının rahat geribildirim gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Fakat dokunsal-görsel birleşim kullanıldığında en iyi iniş performansının elde edildiği görülmüştür. İHA sürüsü dediğimiz filolar binlerce robottan oluşabilir, dış mekânlarda ve nadiren iç mekânlarda çalışabilmektedirler. Dış mekân çalışmaları yapılan alanlarda iniş yüzeyleri genellikle düzensiz ve daha fazla toz bulunan alanlardır. Buda İHA'ların motor pervane vs. gibi fiziksel aksamalarının zarar görmesine sebep olabilir. Helikopter pisti havaalanı gibi çok iyi hazırlanmış iniş noktaları bile olsa konum tahmini hataları, konumlandırması sistemi maliyetlerinin yüksek olması ve sağlamlıkların düşük olması sebebiyle otonom iniş sistemleri bize her zaman en iyi çözümü sunmayabilir

Nesnelerin İnterneti, milyarlarca gerçek hayattaki nesneden ve fiziksel aktiviteden gelen verileri etkili bir şekilde yakalayan, yöneten ve kullanan her yerde bulunan iletişim ağlarını temsil eder. Giyilebilir teknolojilerde nesnelerin interneti konusunun önemli bir tamamlayıcısıdır. Giyilebilir teknolojiler Askeri alanlarda, medikal uygulamalarda, sağlık alanında, bilgi ve eğlence alanında ve endüstri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Giyilebilir teknolojiler, vücudumuzun belli yerlerinde birçok farklı şekilde bulunan cihazlar yardımıyla yapılmaktadır. Örneğin giyilebilir teknoloji olarak; eldivenler, bilezikler, kafa bantları ve kasklar, kontak gözlükleri, kulaklıklar, küreler, dijital kalemler, akıllı giysiler, mücevherler ve hatta dövme bile kullanılmaktadır [8]. Gerçekleştirdiğimiz çalışmanın literatürde yapılan çalışmalardan farklı olma sebeplerinden biri düşük maliyet ile maksimum verim almayı sağlamaktır. Ayrıca uygulamamızın diğer bir üstünlüğü de IMU sensörden alınan gyro verileri yardımıyla, iki eldiven ile elde edilecek hareketlere denk sayıda hareket tanıttımı ve doğru hareket tahmini sağlanmıştır. İnsan-İHA etkileşimi problemi için sunduğumuz çözüm detayları önerilen yöntem kısmında detaylıca ele alınmıştır.

## 2. Önerilen Yöntem

Yapılan çalışmada İnsan-İHA etkileşimi için giyilebilir akıllı eldiven tasarımı gerçekleştirilmiştir. Eldiven aracılığıyla İHA kontrolünün sağlanması için gerekli donanım ve yazılım tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan eldiven üzerinde bulunan sensörlerden alınan veriler, geliştirilen uygulama çatısında kullanılarak veri seti oluşturulmuştur. Elde edilen veri seti üzerinde normalizasyon işlemi uygulandıktan sonra KNN algoritması kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra sınıflandırma işlemi sonucuna göre el hareketine karşılık İHA'nın hangi hareketi gerçekleştirmesi gerektiği, gerçek zamanlı olarak İHA simülasyonuna iletilmiştir [9-12]. Verilerin aktarılması işleminde verilerin doğru aktarılması minimum gürültüyle ve kesintisiz olarak toplanması konusunda dikkatli davranılmıştır. İnsan-İHA etkileşimi için Akıllı eldiven sisteminin çalışma adımları Şekil 3'te belirtilmiştir.

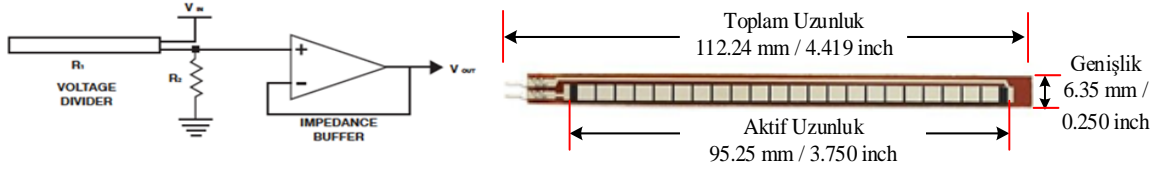


Şekil 3. Geliştirilen akıllı eldivenin çalışma sistemi mimarisi

Eldiven tasarımında kullanılan esneklik sensörü yardımıyla, el hareket ettikçe sensör eğilip büküldüğü zaman sensör üzerindeki direnç değerleri değişerek gerçekleşen el hareketinin sinyali alınmıştır. El hareketi düz durumda iken sensör üzerindeki direnç değeri yaklaşık  $\sim 10K\Omega$ 'dur. Bükülme boyunca direnç  $\sim 20K\Omega$ 'a kadar yükselebilmektedir. Bu direnç değerlerinin belirlenmesi sensörde kullanılan dirence göre değişebilmektedir. Yaptığımız hesaplamalara göre istediğimiz sinyal çıkışını alabilmemiz için 2.2 Kohm'luk direnç tercih edilmiştir.

## 2.1 Esneklik Sensörü Donanımı

Yeni bir yöntem geliştirilirken bir diğerine üstünlük sağlaması açısından birçok parametre vardır. Bunlar hız zaman maliyet vs. gibi sayılabilir. Kullandığımız donanım yazılım bileşeninde amaçladığımız hedeflerden birisi ise düşük maliyetle maksimum verim sağlamak olmuştur. Bu tasarımda kullanmış olduğumuz donanımsal elemanlardan birincisi esneklik sensörüdür(5 adet). Veri seti elde etmek ve el hareketlerini kontrol etmek için kullanılan esneklik sensörleri, temelde direnç mantığı ile çalışmaktadır. Esneklik sensörleri bükülmeye bağlı olarak direnç değerleri değişmektedir. Esneklik sensörleri içyapısı Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Esneklik Sensörü elektriksel çalışma mantığı ve fiziksel özellikleri

Eldiven tasarım sisteminde kullandığımız Pololu marka AltıIMU sensör bünyesinde ivmeölçer, jiroskop, pusula ve barometre sensörlerini barındırmaktadır. Eldiven tasarımında IMU sensör tercih edilmesinin amacı düşük maliyetle daha fazla hareket tanımlamak olmuştur. IMU sensör üzerinde dâhili voltaj regülatörü sayesinde 2.5-5.5V arası bir giriş voltajı ile çalıştırılabilmektedir. IMU sensörü 16 bit çözünürlük ile çalışmaktadır. Sistemde kullanılan IMU, esneklik sensörlerinin temel özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

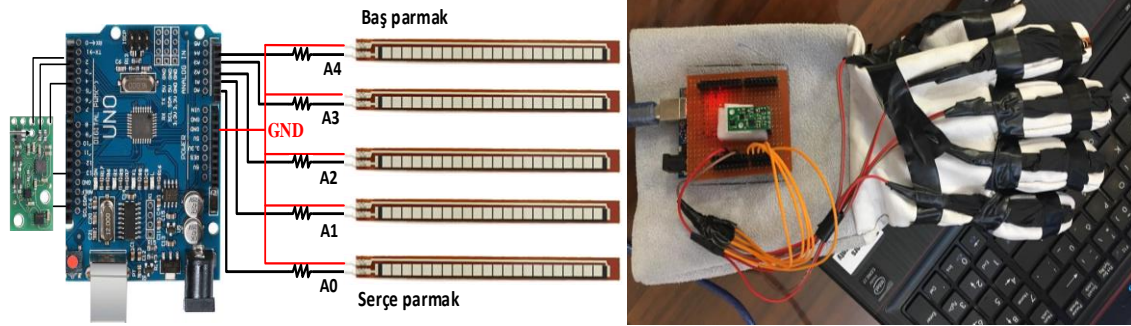
Tablo 1. Esneklik sensörü ve IMU sensör teknik özellikleri.

	Özellikler	Değeri
Esneklik Sensörü	Yaşam Döngüsü	> 1 milyon
	Sıcaklık	35 ° C - + 80 ° C
	Sabit Direnç	10K Ohm ± 30%
	Eğilme Direnci:	60 k için 110 K Ohm
	Güç Derecesi	0.5 W devamlı; 1 W pik
IMU Sensör	Boyutları:	25x 13 x 3 mm
	Ağırlık:	0,8 g
	Giriş Voltajı:	2.5V-5.5V
	Besleme Akımı:	5mA
	Boyutları:	25x 13 x 3 mm
	Gyro:	±125, ±500, ±1000, veya ±2000°/s
	İvme Ölçer:	± 2, ± 4, ± 8 veya ± 16 g

Yukarıda özellikleri belirtilen esneklik sensörleri ve IMU sensörden gelen sinyaller, giyilebilir akıllı eldiven sisteminde kullanılan eldiven üzerine yerleştirilmiş Arduino Uno kartı vasıtasıyla alınmaktadır. Alınan sinyaller dijital değer parametrelerine dönüştürülmektedir. Dijital parametreler gerçekleştirilen uygulama çatısı sayesinde veri seti haline dönüştürülmekte ve sinyaller her hareket için tek tek takip edilebilmektedir. Geliştirilen uygulama çatısı Microsoft Visual C# ortamında gerçekleştirilmiştir. Uygulama çatısı üç adımdan oluşmaktadır; birinci adımda verileri aktarmak için bilgisayarımız ve Arduino arasında seri port bağlantı işlemi gerçekleştirilmektedir. İkinci adımda uygulamamızı başlatıp verilerin veri seti oluşturulacak şekilde kaydedilmesi ve alınan sinyallerin incelenmesi, gerekli sınıflandırma ve hesaplama işlemlerinin toplamından müteşekkildir. Üçüncü adımda ise sınıflandırma sonucu alınan verilerin bizim geliştirdiğimiz İHA simülasyonu ortamında İHA kontrolü olarak gerçekleştirilmektedir.

## 2.2 Eldiven Tasarımı

Giyilebilir akıllı eldiven tasarımı için öncelikle el hareketlerinin rahatlıkla tanımlayabileceğimiz kullanımı rahat esnek bir eldiven tercih edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı eldiven türleri kullanılmıştır [9-12]. Burada bizim asıl amacımız kullanım kolaylığı ve düşük maliyet ile maksimum verim sağlamak olmuştur. Verilerin sağlıklı ve hassas bir şekilde toplanabilmesi için 5 adet esneklik sensörü kullanılmıştır. Esneklik sensörleri el hareketlerinin daha kesin bir biçimde ayırt edilebilmesi için her bir parmağa denk gelecek şekilde eldivene dikilmiş, hareket esnasında kaymaması için sabitlenmiştir. Burada amaçlardan biriside eldivenden alacağımız sinyalleri doğru ve gürültüsüz bir biçimde elde etmek olduğundan ve tasarladığımız bu eldiven her ortamda kullanılacağından dış ortamdan gelecek darbe ve korozyonlara karşı koruma sağlamak amacıyla esnek bir latex katmanla kaplanmıştır. Eldiven tasarımının donanım bileşenlerinin elektronik bağlantıları ve sistemin eldivene sabitlenmiş hali Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Eldiven donanım tasarımı

Bu çalışmada el hareketlerinin algılanması geliştirdiğimiz akıllı eldiven üzerinden verilen komutlara karşılık sensörlerden gelen sinyallerin görüntülenmesi ve bu sinyaller üzerinden elde edilen değerlere göre İHA'yı yönlendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma adımları Şekil 7'de gösterilmiştir. Öncelikle verileri toplamak amacıyla esneklik sensörleri ve IMU sensör Arduino kartı bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Esneklik sensörleri ve IMU sensörden alınan sinyaller Arduino üzerinden ana bilgisayara aktarılmıştır. Ana bilgisayarda geliştirdiğimiz uygulama çatısı vasıtasıyla eldiven bilgisayar arasındaki seri port bağlantıları sağlanmış ve sinyaller ana bilgisayara aktarılmaya başlanmıştır. Alınan sinyaller burada ön işleme yapılarak dijital değer parametrelere dönüştürülmüştür. Ayrıca uygulamamızda el hareketlerine karşılık gelen esneklik sensörlerinden, IMU üzerindeki gyro ve ivme sensöründen alınan veriler grafiksel ifadelerde gösterilmiştir. Bu grafikler uygulama esnasında gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir. Dijital değerler veri seti oluşturmak ve sisteme öğretmek amacıyla uygulama üzerinden belirlenen yer ve dosya tipine göre kaydedilmiştir.

## 2.3 Normalizasyon İşlemi

Eldivenden alınıp kaydedilen verilerin doğru sonuç vermesi açısından el hareketlerine özgü olacak şekilde normalizasyon işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Normalizasyon işlemi uygulamamızın amacı, tasarlanan sistemde elektriksel donanım yapısı bulunduğundan oluşabilecek uç sinyal problemlerini ortadan kaldırarak sınıflandırma işleminin başarı yüzdesini arttırmak ve yanlış sonuçlar vermesini engellemiş olmaktadır.

Normalizasyon işlemi veri setindeki en küçük veriyi, setteki en büyük ile en küçük verinin çıkarılan sonuca bölünerek bulunmaktadır. Veri setindeki her el hareketi için ayrı ayrı normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Normalizasyon işlemi için uygulanan fonksiyonun formülü Denklem 1'de gösterilmiştir.

$$V' = \frac{V - \min(\text{set})}{\max(\text{set}) - \min(\text{set})} \quad (1)$$

## 2.4 KNN Sınıflandırma Algoritması

KNN (K en yakın komşu) sınıflandırma algoritması adından anlaşılacağı üzere ilk olarak bir k değeri belirlenir. Bu değer pozitif bir tamsayı olmak kaydıyla genellikle küçük bir değer tercih edilir. K değeri veri setine yeni veri geldiğinde bakılacak en yakın k tane komşuya bakılması amacıyla seçilmelidir. Belirlenecek yeni değer k adet

komşunun çoğunluk değerine göre belirlenmelidir. Komşuya olan uzaklığı hesaplamak için çoğunlukla Öklid fonksiyonu kullanılır. Öklid fonksiyonunun yanı sıra Manhattan, Minkowski ve Hamming hesaplama yöntemleri kullanılabilir. Bu çalışmada Öklid uzaklık fonksiyonu tercih edilmiştir. Öklid uzaklık hesaplama formülü Denklem 2’de gösterilmiştir.

$$\text{Öklid Uzaklığı } i, j = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (2)$$

Sınıflandırma işleminde uzaklık hesaplama işlemi için her gelen sinyal ön işleme tabi tutulup dijital veri haline geldikten sonra koordinat düzleminde yeni bir nokta olarak tanımlanır. Her yeni noktanın birbirine olan uzaklığı X ve Y eksenindeki değer karşılıklarının karelerinin toplamının karekökünün bulunmasıyla ifade edilir. Uzaklık değerleri hesaplandıktan sonra veriler sıralanır ve gelen değer hangi sınıfa ait olduğu belirlenir.

Çalışmamız gerçek zamanlı veri iletimi ile gerçekleştirildiğinden yeni gelen veri setinden K-NN algoritması kullanılarak bir model oluşturulup alınan sinyaller değerlendirilerek İHA’ya hangi el hareketi türüne göre hangi hareketi gerçekleştirmesi gerektiği iletilmiştir. KNN sınıflandırma algoritması uygulama adımları Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. KNN sınıflandırma algoritması uygulama adımları

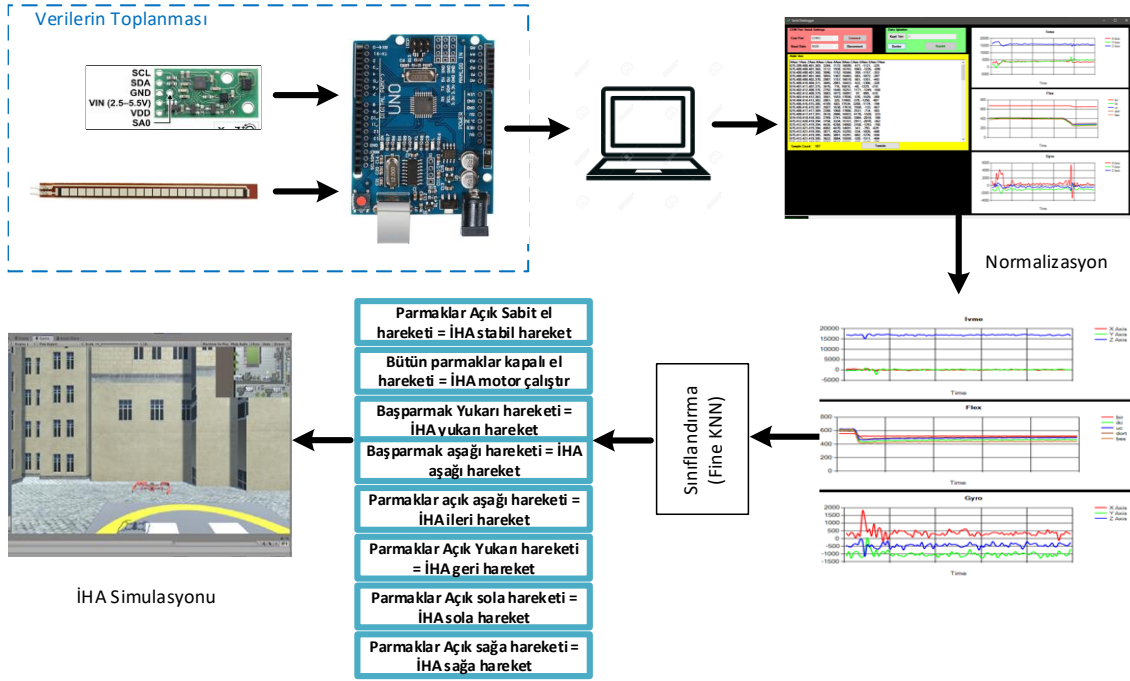
Normalizasyon işleminin ardından KNN algoritması ile sınıflandırılmak için k değeri 3 seçilmiştir. K değeri bu algoritmanın doğru ve hızlı çalışmasını etkileyecek en önemli parametrelerden birisidir. Gelen değerler sınıflandırılırken en yakın komşuya olan uzaklığı hesaplamak amacıyla öklid uzaklık hesaplama formülü tercih edilmiştir. Sınıflandırma sonucunda gelen veriler hangi sınıfa ait ise o sınıfa kaydedilmekte ve gerçek zamanlı olarak İHA’ya iletilmektedir. Böylece belirlediğimiz hareketlere karşılık İHA’nın yapacağı yönlendirme kontrol hareketlerin anlaşılması kolaylaşmıştır. KNN sınıflandırmasında kullanılan veri seti tanımı, her el hareketinde esneklik sensörlerden ve IMU sensörden alınan 11 farklı veri için 26800 örnek içeren 10 hareket türünü barındırmaktadır.

### 3. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde kullanılan donanım ve yazılım bütünü içerikleri teknik özellikleri detaylıca anlatılmıştır. Geliştirilen akıllı eldiven tasarımının detayları ve eldivenin kullanılmasıyla elde edilen deneysel sonuçları ortaya konulmuştur. Deneysel sonuçlara göre uygulamamanın doğruluk tablosu ve başarı yüzdesi verilmiştir.

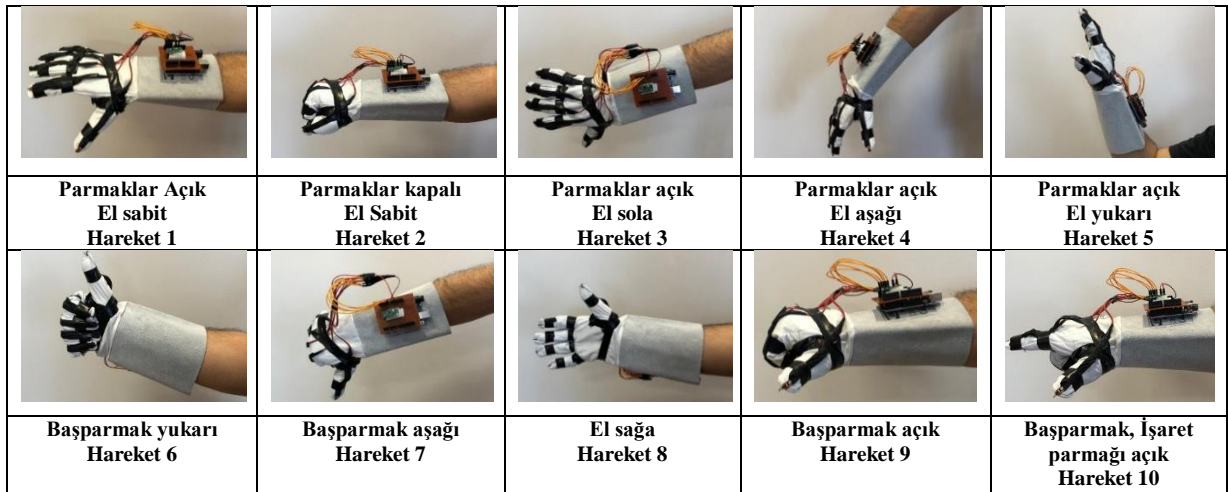
Gerçekleştirilen çalışmada tasarlanan eldivende kullanılan esneklik sensörleri ve IMU sensör yardımıyla Arduino ile alınan sinyallerin doğru ve gürültüsüz bir şekilde alınması sağlanmıştır. Uygulamayı doğru gerçekleştirmek için sensörlerin bağlantı bacakları ve devre kartındaki kablolama işlemi hassasiyetle yapılmıştır. Veri toplama ünitesinden alınan sinyallerin işleme uygun veri seti haline dönüştürülmesi işlemi uygulama çatısı sayesinde sağlanmıştır. Veri seti uygulama çatımız üzerinden istenilen formatta alınıp bilgisayarda istenilen dosyaya kaydedilebilmektedir. Ayrıca alınan sinyaller uygulamamızdaki grafik bilgi ekranından detaylıca ve anlık olarak incelenebilmektedir. Oluşturulan veri setindeki parametrelere harekete özgü olacak şekilde normalizasyon işlemi uygulanarak tekrarlı veriden ve gereksiz bilgileri asgariye indirerek zamandan ve hızdan tasarruf sağlanmıştır. Normalizasyon işleminin ardından elde bulunan verilere KNN sınıflandırma algoritması uygulanarak hareket tanımının belirlenmesi yapılmıştır. Sınıflandırma işlemi bittikten sonra belirlenen başarı oranı yüzdesinin

üstünde olan hareketler Unity ortamında geliştirdiğimiz İHA simülasyonuna iletilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan akıllı eldiven sisteminin çalışma şekli Şekil 7’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

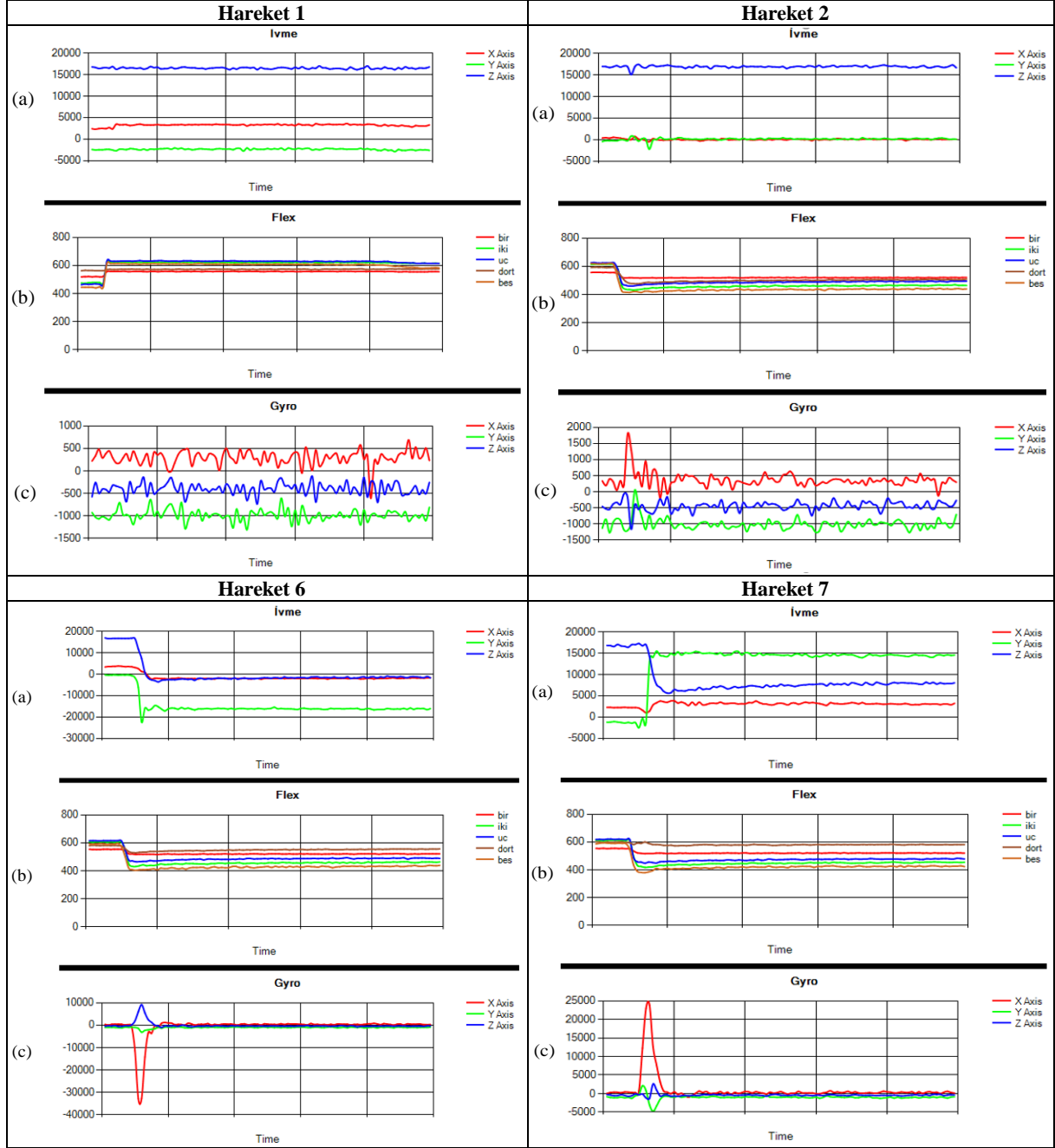


Şekil 7. Akıllı eldiven sistemi çalışma adımları

Yeni bir El hareketi geldiğinde veri toplama kısmında bulunan sensörler Arduino yardımıyla okunarak sinyallerin işlenmesi için ana bilgisayara gönderilmiştir. Ana bilgisayarda işlenen sinyaller veri seti haline dönüştürülüp kaydedilmiştir. Aykırı verilerin doğruluğunun engellememesi için normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Normalizasyon işlemi uygulanan veriler sınıflandırma işlemine tabi tutulmuştur. Sınıflandırma sonucunda gelen verinin uygulamaya göre hangi hareket ait olduğu tespit edilir. O el hareketine karşılık İHA'nın yapması gereken hareket İHA simülasyonuna iletilir. Şekil 8’de hareket tanımlama ve sınıflandırma işleminde kullanılan el hareketleri gösterilmiştir. Veri seti oluşturmak için ve sınıflandırma işleminin kolaylığı açısından Her harekete Hareket1,Hareket2...Hareket10 gibi isimler tanımlanmıştır [9-12].

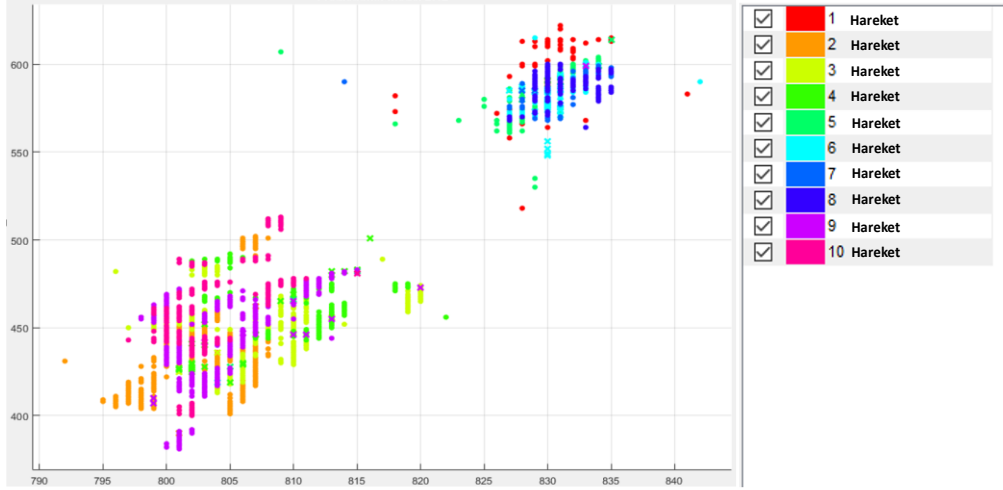


Şekil 8. El hareketleri

**Tablo 2.** 4 El hareketine karşılık örnek sinyal hareketleri

Tablo 2’de Örnek olması açısından Hareket 1, Hareket 2, Hareket 6, Hareket 7 olmak üzere 4 adet el hareketine karşılık gelen sinyal örnekleri gösterilmiştir. Tablodaki grafiklerde (a)’da IMU sensörden alınan ivme verileri X Axis Y Axis Z Axis üç eksendeki hareketleri zaman ekseninde gösterilmiştir. Tablodaki grafiklerde (b)’de Esneklik Sensörden alınan verilerin parmak hareketlerine göre eğilme bükülme hareketlerindeki direnç değer değişiklikleri sinyali, birinci parmak için bir, ikinci parmak için iki, üçüncü parmak için üç, dördüncü parmak için dört, beşinci parmak için beş olan hareket parametreleri zaman ekseninde gösterilmiştir. Tablodaki grafiklerde (c)’de IMU sensörden alınan gyro verileri X Axis Y Axis Z Axis üç eksendeki hareketleri zaman ekseninde gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre uygulama çatısı üzerindeki grafik bölümünden el hareketi sinyalleri incelenebilmektedir. Şekil 8’de gösterilen el hareketlerine karşılık Tablo 2’de gösterilen el hareketi sinyalleri gerçekleşmiştir.

Örnek hareketlere göre Hareket 1’de El havada sabit iken bütün parmaklar açıktır esneklik sensörleri, ivme sensörü ve gyro sensöründen alınan sinyallerde grafik üzerinde bir değişiklik gözlenmemektedir. Hareket 2’de El havada sabit iken bütün parmaklar kapatılmıştır. Esneklik sensörlerinden gelen sinyallerde bu bükme hareketiyle birlikte aşağı yönlü bir değişim gözlemlenmiştir. Parmaklar kapatılırken gerçekleşen kısa harekette ivme ve gyro sensörü grafiğinde küçük hareketler görülmektedir. Hareket 6’ya baktığımızda başparmak açık olacak ve yukarıyı gösterecek şekilde yumruk yapılmıştır. Buna bağlı olarak esneklik sensörünün bir numaralı parametresi hariç değişim gözlenmiştir. Gyro ve esneklik sensöründe x,y ve z eksenlerinde harekete bağlı değişiklikler görülmüştür. Hareket 7’ye baktığımızda başparmak açık olacak ve aşağıyı gösterecek şekilde yumruk yapılmıştır. Buna bağlı olarak esneklik sensörünün bir numaralı parametresi hariç değişim gözlenmiştir. Gyro ve esneklik sensöründe x,y ve z eksenlerinde harekete bağlı değişiklikler görülmüştür.



Şekil 9. Örnek veri seti ile sınıflandırma sonucu

Şekil 9’da gösterilen Akıllı eldiven sistemimizden alınan örnek el hareketi verileriyle oluşturulmuş veri seti üzerinden yapılan KNN algoritmasıyla sınıflandırılmış hareket tipleri belirtilmiştir. Hareket tahmini yapabilmek için veri seti değerleri ve KNN sınıflandırma algoritması parametreleri titizlikle düzenlenmiştir. Sağda gösterilen renk skalasında her hareket için birer renk tanımlanmış ve yeni hareketin bu renkler ile belirtilerek hangi sınıfa ait olduğu gösterilmiştir. Veri seti için, her el hareketinde esneklik sensörlerden ve IMU sensörden alınan 11 farklı veri için 26800 örnek içeren 10 hareket türü için normalizasyon işlemi uygulanmış, 21400 veri elde edilmiştir. Sınıflandırmada kullanılacak verilerden 18000 örnek eğitim için 3400 veri test için kullanılmıştır. Sınıflandırma sonucunda çalışmanın doğruluk oranı % 96,8 olarak sonuçlanmıştır. Her bir verinin boyutu yaklaşık 5,6 byte büyüklüğündedir. Tahmin hızı saniyede 3100 veri olarak gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma simülasyonunun tamamen çalışma süresi 27,951 sn olarak tamamlanmıştır. Akıllı eldiven sistemimiz test aşamasında üst üste çalıştırıldığında minimum % 96, maksimum %97,6 oranında doğru sonuç vermiştir. Sistemimizin 10 kez üst üste çalışması sonucunda ortalama %96,8 oranında doğrulukla sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar Tablo 3’te belirtilmiştir. Geliştirilen İHA simülasyonunda el hareketleri tanımlamasının İHA hareketleri doğru yönlendirip yönlendirmediği gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Sınıflandırma Doğruluk Tablosu

El Hareketi	10
Veri Seti	26800
Maksimum Doğruluk Oranı	% 97,6
Minimum Doğruluk Oranı	% 96
Ortalama Başarı oranı	% 96,8
Standart Sapma	1,1313



#### 4. Sonuçlar

Son yıllarda İHA kullanımının artması bunun sonucunda gelişen ihtiyaç yönetimi İnsan-İHA etkileşimini önemli kılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalara bakılacak olursa gelecekte İHA gibi robot sistemleriyle insanların iletişim sıklığı artacaktır[13-20]. Bu iletişime kolaylık sağlamak amacıyla İnsan-İHA etkileşimi ve giyilebilir teknolojileri beraber kullanma açısından yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada İnsan-İHA etkileşiminde gerçek zamanlı uygulama çatısı geliştirilmiştir. Geliştirilen uygulama çatısı Visual Studio programında C# ortamında yapılmıştır. IMU ve esneklik sensörler kullanılarak eldiven üzerinden esneklik, ivme ve gyro verileri elde edilmiştir. Elde edilen sinyaller gerçek zamanlı izlenerek her bir el hareketi için gözlemlenmiştir. Literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında geliştirilen uygulama çatısının gyro gibi parametreleri kullandığı görülmektedir. Böylece giyilebilir teknolojilerinde İnsan-İHA etkileşimi için gyro sensörünün kullanılabilirliği gösterilmiştir. Gyro ve ivme verileri sayesinde bir eldiven ile en az on hareket kolaylıkla tanımlanabilmiştir. Veri seti üzerinde önce normalizasyon işlemi devamında KNN sınıflandırma işlemi gerçekleştirilerek gelen sinyalin hangi sınıfa ait olduğu tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak el hareketi %96,8 oranında doğru tanımlanmıştır. Simülasyon ortamında İHA kontrolü gerçekleştirilmiştir. Başarıyla gerçekleştirilen bu işlemlerin ardından Unity ortamında geliştirdiğimiz İHA simülasyonuna gerçek zamanlı veriler iletilmiştir. Giyilebilir akıllı eldiven sistemimiz 10 defa çalıştırıldığında minimum %96, maksimum %97,6 doğrulukla çalıştığı gözlemlenmiştir. Sistemin doğru çalışma ortalaması 96,8 belirlenmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Maher A., Li C., Hu H., Zhang B.. Realtime Human-UAV Interaction Using Deep Learning. Chinese Conference on Biometric Recognition CCBR 2017; Biometric Recognition pp 511-519.
- [2] Lee B., Chung W.. Wearable Glove-Type Driver Stress Detection Using a Motion Sensor. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2017; vol. 18, no. 7, pp. 1835-1844.
- [3] Bolin J., Crawford C., Macke W., Hoffman J., Beckmann S., Sen S.. Gesture-Based Control of Autonomous UAVs. Proc. of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems 2017.
- [4] Wu F., Ramchurn S., Chen X.. Coordinating human-UAV teams in disaster response. International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2016.
- [5] Tsvkunov E., et al. SwarmCloak: Landing of a Swarm of Nano-Quadrotors on Human Arms. Asia Emerging Technologies, 2019.
- [6] Labazanova L., Tleugazy A., Tsvkunov E., Tsetserukou D.. SwarmGlove: A Wearable Tactile Device for Navigation of Swarm of Drones in VR Environment, 2019.
- [7] Jhajharia, S., Pal, S. K., Verma, S.. Wearable computing and its application. International Journal of Computer Science and Information Technologies 2014; 5(4), 5700-5704.
- [8] Haptic Interaction. AsiaHaptics. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 535. Springer, Singapore [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3194-7\\_674](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3194-7_674), 2018
- [9] Shin S., Kang Y. and Kim Y.. Hand Gesture-based Wearable Human-Drone Interface for Intuitive Movement Control 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics ICCE2019; Las Vegas, NV, USA, pp. 1-6.
- [10] Hu, B., Wang, J.. Deep learning based hand gesture recognition and UAV flight controls. International Journal of Automation and Computing. 2020: 17-29.
- [11] Hu B., Wang J.. Deep Learning Based Hand Gesture Recognition and UAV Flight Controls. 24th International Conference on Automation and Computing ICAC 2018; Newcastle, United Kingdom, pp. 1-6.
- [12] Karaköse M., Yetiş H., Müezzinoğlu T.. An Investigation of Vision Based Navigation Methods for Unmanned Aerial Vehicles. 7th International Conference on Advanced Technologies ICAT 2018; 483-488.
- [13] Yetiş H., Karaköse M., A New Smart Cargo Cabinet Application for Unmanned Delivery in Smart Cities. International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP), 2018.
- [14] Rajappa S.. Towards Human-UAV Physical Interaction and Fully Actuated Aerial Vehicles. Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät at der Eberhard Karls Universität at Tübingen zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften, 2017.
- [15] Augugliaro F., D'Andrea R.. Admittance Control for Physical Human-Quadrocopter Interaction. European Control Conference (ECC) 2013; Zürich, Switzerland, pp. 1805 - 1810.
- [16] Stegagno P., Rajappa S., Bühlhoff H. H.. Design and Implementation of a Novel Architecture for Physical Human-UAV Interaction", International Journal on Robotics Research, 2017; Vol. 36(5-7) 800-819.
- [17] Cauchard J. R., Jane L. E., Zhai K. Y., Landay J. A.. An Exploration Into Natural Human-Drone Interaction", International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing UbiComp 2015; Osaka, Japan.
- [18] Chen M., Zhang P., Wu Z., Chen X. A multichannel human-swarm robot interaction system in augmented reality. Virtual Reality & Intelligent Hardware, 2020.
- [19] Jiao, R., Wang, Z., Chu, R., Dong, M., Rong, Y., Chou, W.. An Intuitional End-to-End Human-UAV Interaction System for Field Exploration. Frontiers in Neurorobotics, 2019. 13, 117.
- [20] Elfar M., Zhu H., Cummings M. L., Pajic M., Security-Aware Synthesis of Human-UAV Protocols. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, 2019.

## Ağır Metal Gideriminde Grafen Uygulamaları: Adsorpsiyon Teknolojisi

Özgecan MADENLİ<sup>1</sup>, Ece Ümmü DEVECİ<sup>1\*</sup>, Çağdaş GÖNEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye  
<sup>1</sup>ozgemadenli@gmail.com, <sup>1</sup>ecedeveci@gmail.com, <sup>1</sup>cagdas.gonen@gmail.com

(Geliş/Received: 09/07/2020;

Kabul/Accepted: 11/11/2020)

**Öz:** Dünyada artan nüfus ile endüstrilerde aşırı üretim ve tüketim doğmuştur. Bu durum endüstriyelleşmenin hızla gelişmesine ve beraberinde endüstriyel atıksuların içeriklerinin değişmesine neden olmaktadır. Endüstriyel üretimler sırasında toksik madde içerikli atık su oluşmakta ve bu suların doğaya verilmesi ekosistem için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu amaçla verimli bir şekilde atıksuların geri kazanılması veya doğayı tehdit etmeyecek şekilde arıtılarak deşarj edilmesi oldukça önemlidir. Grafen nanomalzemesinin yüksek iletkenlik ve geniş yüzey alanına sahip olması gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı farklı materyallerle işlevselleştirilerek nanokompozit ve biyo-nanokompozit adsorbanlar sentezlenmeye başlanmıştır. Endüstriyel atıksulardan ağır metal giderimi üzerine yapılan araştırmalarda karbon bazlı nanomalzeme olan grafen ve türevlerinin kullanılması son zamanlarda çok dikkat çekmektedir. Grafen bilim dünyasında göstermiş olduğu fark edici özelliklerini adsorpsiyonda da göstermektedir. Grafen bazlı oluşturulan kompozit yapılar; hem fungus gibi mikroorganizmalarla oluşturulan biyokompozit yapıları adsorbanlar hem de Fe, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, EDTA ve PVP gibi kimyasallar ile oluşturulan kompozit yapıları adsorbanlar diğer adsorbanlarla karşılaştırıldığında verimli bir şekilde ayrıcalık göstermektedir. Bu makalede son yıllarda dikkat çekici özellikleri ile ilgi odağı haline gelmiş grafenin, adsorpsiyon teknolojisindeki uygulama çalışmaları incelenerek literatürde yer alan nanokompozit adsorbanların adsorpsiyon kapasiteleri değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Adsorpsiyon, grafen oksit, atıksu arıtımı, ağır metal giderimi, nanokompozit

### Graphene Applications in Heavy Metal Removal: Adsorption Technology

**Abstract:** Increasing population demands in the world have caused overproduction and consumption in industries. This situation causes the rapid development of industrialization and the change of the contents of industrial wastewater. Wastewater containing toxic substances is generated during industrial production and the discharge of these waters into nature poses a serious threat to the ecosystem. For this purpose, it is very important to efficiently recycle wastewater or to be treated and discharged in a way that does not threaten the nature. Due to the various physical and chemical properties of graphene nanomaterial, such as its high conductivity and large surface area, it has been functionalized with different materials and nanocomposite and bio-nanocomposite adsorbents have been synthesized. The use of graphene and its derivatives in studies on heavy metal removal from industrial wastewater has recently attracted much attention. Graphene also shows its distinctive properties in the scientific world in adsorption. Graphene-based composite structures; both biocomposite adsorbents formed by microorganisms such as fungi and composite adsorbents formed with chemicals such as Fe, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, EDTA and PVP are efficiently distinguished compared to other adsorbents. In this article, the application studies of graphene in adsorption technology are examined and the adsorption capacities of nanocomposite adsorbents in the literature are evaluated.

**Key words:** Adsorption, graphene oxide, wastewater treatment, heavy metal removal, nanocomposite

### 1. Giriş

İnsanlığın yeryüzündeki yaşamını sürdürebilmesi için en önemli yaşam kaynaklarından biri sudur. Son yıllarda, yaşam kalitesini arttırmak amacıyla aşırı miktarda üretim ve tüketim gerçekleşmektedir. Artan tüketim talebi karşılayabilmek için üretimde hızlı bir artış olmuş ve endüstriyelleşme de kapasite artmıştır. Endüstride artan üretime paralel olarak su tüketimini de katlanarak artmıştır. Üretim sırasında kullanılan su kaynakları ekosistemin arıtma kapasitesinin üzerinde atık su olarak geri dönmekte ve var olan temiz su kaynaklarını da kirletmektedir. Şu an dünyada özellikle kurak ve yarı kurak ülkelerde ciddi anlamda su kıtlığı yaşanmaktadır. Hali hazırda bulunan su kaynaklarının tüketimi ve yüksek miktarlarda atık su oluşumu çevre teknolojileri araştırmacılarını çözüm arayışlarına yönlendirmiştir.

Hızla artan nüfusun ve iklim değişikliğinin de etkisi; atık su arıtımında yeni arıtım yöntemleri ve teknolojiler doğmaktadır [1]. Günümüz su problemleri göz önüne alınarak geleceğe yönelik teknolojiler üretmek ve sürdürülebilirliği sağlanması istenilmektedir. Çevresel anlamda ciddi problemler doğuran endüstriyel atıkların içeriği tipik olarak; radyoaktif kirleticiler, boyar maddeler, toksisite etkisi yüksek maddeler, farmasötik kimyasal maddeler, ağır metaller ve organik kirleticilerden oluşmaktadır [2-4].

\* Sorumlu yazar: [ecedeveci@gmail.com](mailto:ecedeveci@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0002-8673-3963, <sup>2</sup>0000-0002-7551-188X, <sup>3</sup>0000-0002-7551-188X

Sularda radyoaktif kirliliğe yol açan endüstrilerin kaynağı; radyoaktif nükleer reaktörlerden ve radyoaktivite temelli tıbbi kaynaklı atıklardır. Radyoaktif kirlilikler doğada toprağın yapısını bozarak bitkilerin gelişimine engel olup canlıların mutasyona uğraması ve kanser gibi hastalıkların dünyada yayılmasına neden olmaktadır [5]. Ağır metal kirleticileri, metallere 5 g/cm daha büyük yoğunluğa sahiptir [6]. Kurşun, cıva, kadmiyum, arsenik ve krom farklı endüstrilerde kullanılan yaygın ağır metallere bazılardır [7]. Ağır metallere sularda çözünmesi ve WHO'nun belirlediği sınırların üzerinde doğaya deşarj edilmesi flora ve faunayı etkilemekte ve aynı zamanda insan sağlığı açısından karaciğer ve nörolojik rahatsızlıklar gibi ciddi hastalıklara neden olmaktadır [8]. Bir diğer artımı zor ve kullanımı yaygın olan kirletici ise pestisitlerdir. Çok düşük konsantrasyonlar da canlı yaşamını tehdit eden ve doğada geri dönüşü olmayan hasara yol açmaktadır. Pestisitlerin doğada yayılıp insan vücuduna taşınması nörolojik hastalıklara, karaciğer rahatsızlıklarının yanında hormonal bozukluklara sebep olarak riskli ve kusurlu doğumlara yol açabilmektedir [9]. Fenol bakımından içeriği yüksek atıksulara bakıldığında oluşturduğu en önemli tehdit insan vücudunda birikmesidir. İlaç sanayi alanında ise bir diğer tehdit antibiyotiklerdir. Antibiyotiklerin dünyada yıllık tüketimi 100.000 i aştığı ve yaklaşık 20 tona ulaşabildiği bildirilmiştir [10]. İnsan vücudunda metabolik olarak bozulmaya uğramayan antibiyotiklerin ortalama %60'ı atık sistemine atılır. Antibiyotiğin bozulması sonucu oluşan yan ürünleri toksik olduğundan ekosistem açısından büyük problemlere yol açabilmektedir. Araştırmalarda ulaşılan son bilgilere göre; 100.000 den fazla farklı endüstrilerde kullanılan çeşitli boyar maddeler sucul ortama verilmektedir [11]. Su dünyasına en büyük katkıyı yapan endüstri alanları tekstil, boya, kağıt ve deri sanayidir [11, 12]. Sucul ortama verilen boyar maddeler güneş ışınlarının ortama girişini engellemesi ve sudaki oksijen miktarının düşmesi sonucu sudaki canlıların yaşamlarını tehlikeye atmaktadır. Tüm bu ortaya çıkan problemlerin temel kaynağı su kirliliğidir. Suların kirlenmesinin ve artılmamasının yanında hali hazırda tatlı su kaynaklarının da tükenmesi dünyada ciddi bir etki yaratmıştır. Yukarıda belirtilen kirleticilerin tamamının yetersiz artımı veya hiç arıtılmadan doğal ortama deşarjı; üzerinde yaşanan ekosistemin yok olmasıyla birlikte insan sağlığını etkilemektedir.

Atık suların artımını sağlayan geleneksel atıksu artıma teknolojilerinde sırasıyla kimyasal çöktürme, membran filtrasyonu, elektrokimyasal artım, adsorpsiyon vb. yaygın kullanılan yöntemlerdir [13–16]. Artıma yöntemleri ve dezavantajları Şekil 1'de verilmektedir. Bu yöntemlerin bazılarının yetersizlikleri, uygulama zorlukları veya maliyetleri çevre teknolojileri alanında yeni yöntemlerin bulunması için yapılan çalışmalara yol gösterici olmuştur.



Şekil 1. Geleneksel su artıma yöntemleri ve dezavantajları

Belirtilen artım teknolojileri arasında geliştirilmesi ve uygulanabilirliği açısından en verimli adsorpsiyondur. Adsorpsiyon yönteminin maliyet açısından uygunluğu, kullanımının kolaylığı ve toksik organik-inorganik türlerin sulu ortamdan kolay ayrılabilirliği ve ayrılan toksik materyalin biyolojik yapıları etkilemeden bertarafının sağlanması yöntemin avantajlarını ön plana çıkarmaktadır [17]. Adsorpsiyon teknolojisinde en önemli kriter adsorbanın desorpsiyon kapasitesidir. Desorpsiyon kapasitesi yüksek olan bir adsorbanda toksik ve tehlikeli nitelikteki bir atık güvenli bir şekilde geri kazanılabilmektedir.

### 1.1 Grafen ve artım teknolojileri

Son yıllarda nanoteknoloji alanında karbon bazlı malzemelerin üretimi artmaktadır. Çevre teknolojilerinde artım için verimli malzeme üretiminde karbonlu malzemeler kullanılmaktadır. Ancak bu karbon bazlı malzemelerin gelişen teknoloji ile üretilmesi sonucu elde edilen verimli ürünlerin kullanılmasıyla yapılan atıksu artımlarındaki verim artışları gelecek vadettir. Karbon bazlı malzemelerden biri olan grafen tarihsel gelişiminden bu yana atık su artımını dahil pek çok alanda kullanılmaya başlanmıştır [18]. Grafenin iyi bir adsorban

olarak çevresel iyileştirmede kullanılması gelecekte su arıtımına umut veren yeni bir teknoloji olması ile dikkat çekmektedir.

Yenilikçi malzeme üretiminde grafenin kullanılmasının önemli avantajları vardır; yüksek elektriksel iletkenliği, iyi bir mukavemet yapısına sahip olması ve çevresel olarak uyumlu olması grafen türevli kompozit malzemelerin çevre teknolojilerinde kirleticilerin sulardan uzaklaşmasında tercih edilmektedir.

Grafen, fotokataliz [19], kataliz [20], inorganik metallerin uzaklaştırılması [21], ilaç [22], organik kirleticilerin giderimi [23] ve kompozit malzeme üretiminde kullanım uygunluğu ve mükemmel bir yüzey alana sahip olması, elektronik, kimyasal ve termal özellikler sergilemesi gibi özellikleri nedeniyle birçok araştırmada tercih edilmektedir.

Bu derlemenin amacı, grafen ve türevlerinin tarihsel gelişimi ve tanımlanmasına yer verilerek çevre teknolojileri alanında adsorpsiyonun uygulanabilirliği açısından yapılan çalışmaların bir araya getirilerek değerlendirilmesidir.

Grafitin tek atomik katmanlarını tanımlamak için 1986'da "grafen" önerilmiştir [24]. 1995 yılında, Uluslararası Saf ve Uygulamalı Kimya Birliği (IUPAC) tarafından tanıtılmıştır [25]. Günümüzde bilim insanları tarafından grafen alanında kullanılan temel kavram ve terminoloji Katsnelson tarafından geliştirilmiştir [26].

Grafen, atomik olarak ince 2 boyutlu (2B), bal peteği yapısında bir  $sp^2$  karbon atomu yapıdadır. Yüksek mekanik mukavemet, elektriksel iletkenlik, moleküler bariyer yetenekleri ve diğer dikkate değer özelliklere sahip olduğu gösterilmiş ve nano dünya tarafından oldukça yoğun ilgi görmüştür ve görmeye de devam etmektedir. Grafenin bu eşsiz özellikleri Tablo 1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

**Tablo 1.** Oda sıcaklığında tek katmanlı grafenin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikleri	Değerler	Referanslar
Şeffaflık	%97	[27]
Teorik yüzey alanı	$2630 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$	[28]
Termal iletkenlik	$5000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	[29]
Elektron hareketliliği	$200.000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$	[29]
Kırılma gücü	$2.4 \pm 0.4 \text{ TPa}$	[30]

Bahsedilen özelliklerinden dolayı grafen; sayısız araştırmanın konusu haline gelmiş ve polimer bazlı nanokompozitlerin tasarlanması için grafenin polimerlere dahil edilmesine yönelik çalışmalar başlamıştır [31]. Ancak, bozulmamış grafen kullanımı Van der Waals etkileşimlerinden dolayı; aşağıdan yukarıya sentez, zayıf çözünürlük ve çözelti içinde yığılma nedenleriyle zorlayıcı olmuştur. Alternatif olarak yapısal olarak grafene benzer olan bileşikler, saflaştırılmış grafenin avantajını elde etmek ve aynı zamanda yüzeyi fonksiyonel hale getirilmiş oksijen gruplarıyla doldurmak amacıyla, yukarıdan aşağı bir yöntemle grafit veya diğer karbon kaynaklarından sentezlenebilir. Protonlaşmış grafitin oksidasyonu, çok sayıda istiflenmiş grafit oksit katmanından oluşan grafen oksite (GO) yol açar [32].

GO, grafene benzer bir altıgen karbon yapısına sahiptir. Fakat aynı zamanda hidroksil (-OH), alkoxy (C-O-C), karbonil (C=O), karboksil asit (-COOH) ve diğer oksijen bazlı fonksiyonları içerir. Bu oksijenli gruplar, sentezlenme kolaylığının yanı sıra yüksek çözünürlüğe sahip olup, nanokompozit malzemelerde kullanım için de uygundur. Ayrıca yüzey işlevselleştirme olasılığı, özelliği sebebiyle grafen için birçok avantaj oluşturmaktadır. Ayrıca GO yapısındaki oksijen gruplarının sayısını en aza indirme ve bozulmamış grafeninkine daha yakın özellikler elde etmek için indirgenmiş grafen oksidi (rGO) yöntemleri geliştirilmiştir [33]. Son zamanlarda, yanal boyutları <100 nm den büyük grafen tabakaları olan grafen kuantum noktaları (GQD) olarak bilinen başka bir grafen türevi sınıfı ortaya çıkmıştır.

Grafenin türevleri ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalarda, grafen türevlerinin (GO, rGO, GQDs) polimer nano kompozit malzemelerin üretiminde etkili olduğu kanıtlanmış ve ideal malzeme özelliği ile polimer matrislerindeki dağılılırlığı sayesinde birçok uygulama alanı açılmıştır.

## 2. Grafen Uygulamalarında Adsorpsiyon

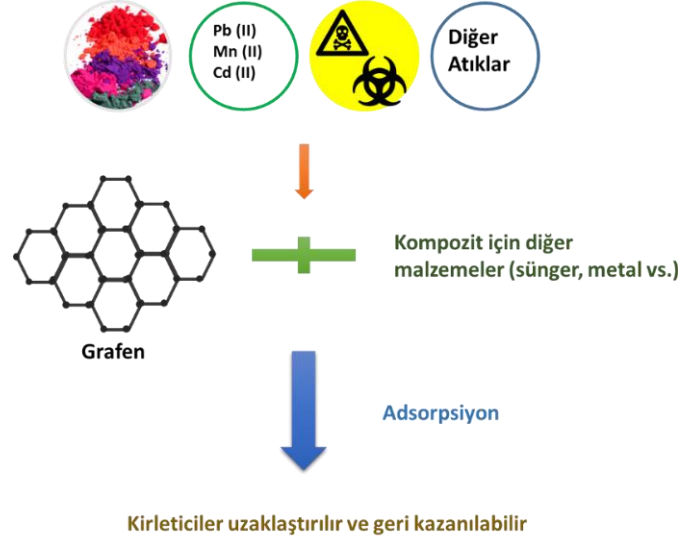
Adsorpsiyon, atık sular içerisindeki organik ve inorganik kirleticilerin gideriminde etkili bir yöntemdir [34]. Adsorpsiyonun çalışma mekanizması, adsorban üzerine farklı karakterlerdeki kirleticilerin birikmesi ve ortamdan ayrılması temeline dayanmaktadır. Adsorpsiyon da önemli parametreler; yüzey alanı genişliği ve gözenek hacmidir [35]. Adsorpsiyon teknolojilerinde geçmişte karbon nanotüpler ve aktif karbon içeriği olan adsorbanlar

üretirken şu anki araştırmalarda biyo-adsorbanlar, nano adsorbanlar ve kompozit adsorbanlar üzerine çalışılmaktadır. Nano yapı malzemelerden biri olan grafen ve türevlerinin de adsorpsiyon teknolojisinde bir katkı malzemesi olarak kullanılması dikkat çekmektedir. Grafenin nanokompozit oluşturmasıyla ilgili bilgi Şekil 2’de verilmiştir. Ayrıca son 10 yıl içerisinde grafen ile kompozit oluşturularak yapılan adsorpsiyon çalışmaları genel olarak Cr, Ni, Cd, Pb, U(VI), Hg ve Cu giderimi üzerine yapılmıştır ve bu çalışmalar Tablo 2’ de verilmiştir. Tablo2’ye göre grafen biyolojik ve EDTA (etilendiamin tetraasetik asit) gibi kimyasal yapılarla kompozit üretilmiş ve yüksek konsantrasyonlarda ağır metal giderimi yapılabilmektedir. Bu kompozit yapılarda kullanılan fungus gibi canlılarda ağır metal adsorpsiyonu ile ilgili çalışmalara mevcuttur. Ancak grafen ile oluşturulan biyokompozitlerde adsorban kapasitelerinin saf fungus kullanılması ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu bildirilmiştir. Grafen demir tozları gibi manyetik alan oluşturulan nanomalzemeler ile kompozit oluşturulduğunda ortamda ağır metal iyonlarını daha verimli ve hızlı adsorplandığı dolayısıyla, adsorban kapasitesini arttırdığı belirlenmiştir [37, 41, 50]. EDTA ile adsorpsiyonun etkisi incelendiğinde; Croitoru ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, kitosan/GO yapılarına EDTA eklenmesi onlarla stabil şelatlar oluşturarak ağır metallerin elimine edilmesi için yüksek adsorpsiyon kapasitesine yol açmaktadır [36]. Bu çalışmalar ile grafen içerikli adsorbanın kapasitesinin, uygulanan kompozit yapısına göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle kapasite artırılması amacıyla uygulanan yenilikçi ve sürdürülebilir çalışmalar araştırma gerektirmektedir.

**Tablo 2.** Ağır metal gideriminde grafen uygulamaları

	Adsorban	Adsorban kapasitesi(mg/g)	Referanslar
Cr	Tetraethylenetetramine/polypyrrole/GO aerogel	408,48	[37]
	MGO	24,33	[17]
	(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -GS)	17,29	[38]
	GO-CS	67,80	[39]
	β-CD/GPTMS/GO	352,71	[40]
	FGCs	200,00	[41]
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /graphene	280,60	[42]
	CDGF	107,00	[43]
Ni	MGO	51,02	[17]
	FGC	12,24	[44]
Cd	SH/Grafen Biyo-sünger	102,01	[45]
	MGO	91,29	[46]
	(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -GS)	27,83	[38]
	M-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -GO	125,00	[47]
	GO-MO	13,00	[48]
	GO-OM	70,10	[49]
Pb	CS/EDTA/GO	767,00	[36]
	MGO	200,00	[17]
	SH/Grafen Biyo-sünger	101,01	[45]
	PVP/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /GO	793,65	[50]
	(Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -GS)	27,95	[38]
	EDTA-mGO	508,40	[51]
	EDTA-MCS/GO	206,52	[52]
	GO/Pal	106,60	[53]
	3D GXT composite	199,22	[54]
U(VI)	FFGS	219,71	[55]
	FH/GO	288,64	[56]
	(MOFs)/GO	268,82	[57]
	GA	238,67	[58]
Hg	EDTA-mGO	268,40	[51]
	Tourmaline/GO	294,12	[59]
	(GONRs)	33,02	[60]
	Magnetic PPy-GO	400,00	[61]
Cu	GS	228,00	[62]
	EDTA-mGO	301,20	[51]
	EDTA-MCS/GO	207,26	[52]
	MGO	62,89	[17]
	GO-MO	29,70	[63]

Grafenin belirtilen özellikleri dikkate alındığında büyük yüzey alanı, elektriksel iletkenliği ve kimyasal yapısı bakımından sularda kirletici parametreleri uzaklaştırmak için umut verici bir adsorbandır. Fakat saf (bozulmamış) grafen yapılarında gözeneklilik mevcut değildir [18]. Gözeneklilik özelliğinin olmaması sebebiyle farklı gözenekli yapıya sahip fonksiyonel malzemelerin (kitosan, silika ve jelatin) birleşimi ile hem yüksek kapasiteli adsorbanlar elde edilebileceği hem de artımda membrana benzer bir işlev katan gözenekli yapı elde edilebileceği belirtilmektedir[64]. Yüksek adsorbsiyon performansı için kullanılan fonksiyonel malzemelerin adsorbat ile etkileşimi; temas süresi, pH, dozaj miktarı ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır [55]. Nano yapıli bir adsorban olarak farklı karakterizasyonlara sahip atıksular içerisinde uygulanabilirliği test edilmiş çalışmalar mevcuttur.



Şekil 2. Atıksu gideriminde grafen ve kompozitlerin uygulanması

### 3. Grafen Türevli Adsorbanlar ile Ağır Metal İyonlarının Giderimi Üzerine Çalışmalar

Ağır metal ve iyonları gibi giderimi güç kirleticilerden oluşan endüstriyel atıksuların canlı vücudunda birikmesi, ekosistem için risk oluşturmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi geleneksel yöntemler ağır metal gideriminde kısıtlı bir kapasiteye sahiptir. Ancak ağır metal gideriminde manyetik özelliklere sahip adsorbanlar kullanılması birçok zorluğa çözüm olarak görünmekle birlikte metallerin geri dönüşümünü de mümkün kılmaktadır. Ağır metal giderimi için birçok araştırmacı, manyetik malzeme kullanımına yönelmiş ve bunun için grafen kullanmışlar, ancak mevcut yöntemlerin geliştirilmesi gerektiğini vurgulamışlardır [45, 50, 56]. Manyetik grafenin işlevselleştirilip değerli metallerin geri kazanımı da söz konusu olmaktadır.

Yap vd. (2020), sürdürülebilir çevreye ve yeşil kimyaya katkı sağladıklarını vurgulamışlardır. Yaptıkları çalışmada aljinat bazlı biyo sünger formunda kararlı ve sağlam adsorbanlar üretebilmek için işlevselleştirilmiş indirgenmiş grafen oksit (rGO) kullanılmışlardır. Bunun için ilk olarak adsorpsiyon işleminden sonra ağır metallerin geri kazanımı için grafen-aljinat ağının stabilizasyonu sağlayıp ve manyetik alan oluşturmak için rGO ağının içine manyetik demir oksitler yerleştirilerek, adsorban malzemenin kapasitesinin arttırmışlardır. Yapılan bu çalışma SH-Grafen biyo-sünger Pb(II) ve Cd(II)'nin gideriminde kullanılmıştır. Adsorbanın maksimum tutma kapasitesi, Pb (II) ve Cd (II) için sırasıyla 101,01 mg/g ve 102,99 mg/g olarak rapor edilmiştir [45]. Üretilen bu biyo-nano adsorban malzemenin sürdürülebilir ve geliştirilebilir bir ölçekte olduğu da belirtilmiştir.

Ain ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise grafen oksit yüzeyine demir oksit ( $Fe^{+3}$ ) modifiye ederek manyetik grafen oksit parçacıklı adsorban malzeme üretilmiştir. Üretilen bu adsorban malzeme ile Cr, Cu, Zn, Pb gibi farklı değerli metal iyonlarının arıtımı ve negatif bakteri suşlarının anti-mikrobiyal aktivitesi üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Adsorpsiyon performansını analiz etmek için, pH (3-9), sıcaklık (25-55 ° C), temas süresi (10-65 dakika) ve adsorban doz (0.002 - 0.016 g) gibi farklı parametrelerin etkisi araştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada rapor edilen sonuçlar incelendiğinde; pH 5'te Pb için %89.61, pH 6'da Cr için %92.03, pH 6'da Cu için %92.43, pH 7'de Zn için %90 oranlarında giderim tespit edilmiştir. Farklı bakteri suşlarından ve farklı konsantrasyonlarda inaktivasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve 60 dk boyunca disk difüzyonu yöntemi ile değerlendirilmiştir. 0,5 mg/mL grafen içerikli adsorban ile *Escherichia coli* %98.79 oranında tutunmuş ve

ortamdan uzaklaştırılarak inaktive edilmiştir. Aynı dozajda *Yersinia ruckeri* ve antibakteriyel aglomeraları ise sırasıyla %97,15 ve %97,69 oranında ortamdan uzaklaştırabilmiş ve inaktive edilmiştir. Gerçekleştirilmiş bu durumlarda üretilen nano kompozit malzemenin dezenfektan olarak kullanılabilirliği araştırmacılar tarafından ispatlanmıştır. İncelenen kompozit malzemenin adsorpsiyon işleminin hızlı olduğu ve adsorpsiyon işleminin yanında aynı zamanda mükemmel bir antimikrobiyal malzeme olduğu belirlenmiştir [17]. Bu tür güncel çalışmalar çevre teknolojileri alanında yeni nano malzeme üretimine ışık tutmaktadır.

Grafenin uygulandığı bir diğer çevre uygulaması ise atık gazetelerle ilgilidir. Chen ve arkadaşları (2020) tarafından yapılan çalışmada atık gazetelerin grafen oksit ile modifiye edilmesiyle yenilenebilir ve sürdürülebilir bir adsorban malzeme üretilmiştir. Grafen gibi karbon yapıları nano malzemelerin farklı karakteristikte farklı yapıda malzemeler ile birleştirilmesi adsorban malzemenin, adsorbatlara olan duyarlılığını değiştirmektedir. Atık gazeteler hammaddenin sürekliliği açısından değerlendirildiğinde yaygın olarak, ucuz ve kolayca bulunan atık türü olduğu için bu çalışmada tercih edilmiştir. Atık gazete içeriğine bakıldığında yaklaşık %61 selüloz ve %16 hemiselüloz ve diğer inorganik dolgu maddeler ve baskı mürekkebi içermektedir. Gazete hamuru, mekanik hamurdan oluşan karmaşık bir selüloz malzemedir ve metal iyonlarının daha yüksek oranda çıkarılacağı rapor edilmiştir. Bu nedenlerden ötürü atık gazete bileşenlerinden tam olarak yararlanmak önem arz etmektedir. Adsorpsiyon çalışmasının analizleri; adsorban malzeme üretiminde grafen oksitin etkisi, pH'ın etkisi, adsorpsiyon kapasitesinin belirlenmesinde farklı adsorban dozlarının kullanılması, temas süresi ve sıcaklığının etkisi rapor edilmiştir. Grafen oksit farklı (1, 3, 5 ve 7 mg/mL) konsantrasyonlarda hazırlanarak adsorpsiyon çalışmaları yapılmıştır. Kademeli olarak artırılan dozajın belli bir seviyeden sonra doygunluk seviyesine ulaştığı belirtilmiştir. 7 mg/mL den maksimum kapasiteye ulaşırken 9 mg/mL dozda kapasitede bir artış olmadığı gözlemlenmiş ve adsorban doygunluk seviyesine ulaştıktan sonra adsorban dozunun artırılmasının kapasiteyi arttırmadığı rapor edilmiştir. Üretilen nano kompozit malzemenin yüzeyinde yer alan fonksiyonel gruplar ile adsorbat arasında kurulan etkileşimin pH açısından önemli olduğu bildirilmiştir. pH değeri nötr durumda veya zayıf alkalik durumda iken metal iyonları çöker ve iyonik konsantrasyon büyük ölçüde azalır. Bunun nedeni, metal iyonlarının çökelti oluşturmalarını önlemek için sodyum hidroksit ve seyreltik hidroklorik asidin kullanılması olarak rapor edilmiştir. Sonuç olarak pH 6'da Pb ve Cd metal iyonları optimum adsorpsiyon kapasitesine ulaştığı ve Ni içinse pH 4'de optimal adsorpsiyon sonucu gösterdiği araştırmacılar tarafından gözlemlenmiştir. Bu çalışmada üretilen adsorbanın Pb<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> ve Cd<sup>2+</sup> metal iyonlarının adsorpsiyon verimliliği sırasıyla %91,68, %64,00 ve %67,33 olarak verilmiştir. Adsorbanların geri kazanımının adsorptif teknolojinin sanayileşmesinden önce çözülmesi gereken önemli bir engel olduğu bilindiği için Chen ve arkadaşlarının (2020) yaptığı çalışmada adsorpsiyon 3 döngüde test edilmiştir ve adsorpsiyon kapasitesinin %80 üzerinde kalması sağlanarak adsorban metal elüsyonundan sonra tekrar kullanılabilir olduğu görülmüştür [65].

İncelenen çalışmalar içerisinde nano kompozit malzeme üretiminde sünger, atık gazete ve mikroorganizma gibi ürünler kullanırken Yang ve arkadaşları (2019) çalışmasında membran üretiminde kullanılan malzeme olan polivinilpirolidon ile grafen bir araya getirilerek adsorban malzeme üretilmiştir. Yang ve arkadaşları tarafından polivinilpirolidon, demir oksit tozları ile birleştirilmiş ardından grafen oksit ile modifiye edilmesiyle nano kompozit malzeme oluşturularak adsorban malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Polivinilpirolidonun (PVP), ağır metaller için çok sayıda adsorpsiyon yeri sağlayan C-O ve C-N dahil olmak üzere çok sayıda fonksiyonel grup içerdiği bilinmektedir. Buna ilave olarak PVP dolgu malzemesi olarak ilaç sanayi, gıda sanayi ve kozmetik gibi birçok farklı endüstrilerde de kullanılmaktadır. Bu makalede adsorpsiyon çalışmalarında pH etkisi, temas süresi etkisi, adsorban dozu etkisi ve desorpsiyon ve adsorbanın tekrar kullanılabilirliği incelenmiştir. Adsorbanın yüzey yükü, iyonlaşma derecesi ve adsorbat türlerinin çözeltinin pH değeri ile yakından ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle başlangıç pH'ı ağır metal iyonlarının giderilmesinde temel bir parametre olmuştur. pH (3-10), temas süresi (100-500 dk) ve adsorban dozajı (0.5-2.0 mg/mL) aralığında adsorban kapasitesi ve verimliliği çalışmaları rapor edilmiştir. Sonuç olarak pH 5'te, 100 dakika da ve 0.75 mg/mL adsorban dozunda maksimum adsorpsiyon kapasitesini 793,65 mg/mL elde ettiklerini bildirmişlerdir. Aynı zamanda üretilen bu Polivinilpirolidonun/grafen oksit/demir oksit adsorban malzemesi 3 farklı gerçek atıksuda denemeleri yapılmış ve %99 Pb(II) giderim gerçekleştirildiği makalede rapor edilmiştir [50].

Rapor edilen diğer çalışmalardan farklı olarak Liang ve arkadaşları, amino fonksiyonel grupları sağlamak için çapraz bağlama ajanları ve nitrojen kaynakları olarak pirol ve tetra etilen tetramin kullanılarak hidrotermal kendi kendine birleştirme yöntemiyle 3 boyutlu nitrojen katkılı grafen oksit aerogeli hazırlanmıştır. Cr(VI) gideriminde kullanılan nitrojen katkılı grafen oksit aerogeli 408,48 mg/g adsorban kapasitesi sergilemektedir [37].

Son yıllarda, araştırmacıların nano-mikrobiyolojik teknoloji ile birçok nano kompozit sentezleyerek nano-biyoteknoloji çalışmaları literatürlerde artış göstermeye başlamıştır. Funguslar hif yapılarında fosfonat, hidroksil ve amin grubu gibi fonksiyonel grupları hücre duvarlarında bol miktarda bulunması nedeniyle nanomalzemelerin biyo-şablonu olarak kullanılmaktadır. Hif yapıları nanoteknoloji dünyasında; antibakteriyel malzemeler, sensörler,

elektronik malzemeler ve ayrıştırma malzemelerinde kullanılır. Funguslar kültür halinde yapıya eklenerek nano parçacıkları hif yapısı içerisine hapsederek kürecikler oluşturmaktadır. Bu da çok katmanlı hiyerarşik bir yapı oluşmasını sağlamaktadır [55]. Zhu ve arkadaşlarının (2019) yaptığı çalışmada ise fungal hif yapısı, demir oksit ve grafen oksit ile birleştirilerek elde edilen grafen nanokompozit küreleri, uranyum ve metilen violet içeren atıksuların gideriminde biyo-nano adsorban kullanılmıştır. Nanokompozit malzemede mikroorganizma kullanılması adsorbanın pH'ya duyarlılığını arttırdığı bildirilmiştir. Bu yüzden uranyum gideriminde pH 7'den sonra adsorpsiyon kapasitesi düşerken metilen violet de arttığı rapor edilmiştir. Bu durum kirletici içeriğinde bulunan fonksiyonel gruplardan kaynaklandığı bildirilmiştir. Adsorpsiyon çalışmasında temas süresi demek adsorban malzemenin adsorbat ile etkileşimi üzerine adsorbanın doygunluk seviyesine ulaşmasıdır. Bu çalışmada 2 farklı karakterizasyona sahip atıksularda temas süresi incelendiğinde; metilen violet 100 dakikadan sonra doygunluğa ulaşırken uranyum ise 80 dakikada doygunluğa ulaşmıştır. Bunun sebebi uranyumun adsorban içerisindeki demir tozları ile manyetik bir çekim alanı oluşturmasıdır. Bu çalışmada da adsorpsiyon kapasitesi uranyum için; pH 5'te ve 293 K sıcaklıkta 219,71 mg/g tespit edilirken metilen mavisi pH 7'de ve 303 K sıcaklıkta 117,35 mg/g olarak tespit edilmiştir [55].

Yapılan literatür araştırmalarında farklı fungal çeşitleri ile grafen çalışmaları yapılmıştır. Li ve arkadaşlarının (2018) yaptığı çalışmada *Xlaria* mantar türü ölü olarak kullanılıp grafen ile adsorban çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı nükleer santralde enerji üretimi için kullanılan uranyumun gideriminde adsorban olarak kullanmak için grafen-hif yapısı oluşturulmuştur. Grafen-hif yapısı oluşturduktan sonra farklı sıcaklıklarda (400-600-800°C) piroliz işlemi uygulanarak farklı yüzey alanları elde edilmiştir. Her sıcaklıkta sırasıyla 671 m<sup>2</sup>/g, 746 m<sup>2</sup>/g ve 894 m<sup>2</sup>/g değerlere sahip yüzey alanı değerlerine ulaşılmıştır. Piroliz işlemi öncesi gözenek boyutları 4 nm olan materyalin, piroliz sonrası 2 nm boyutunda olduğu tespit edilmiştir. Piroliz sonrası elde edilen farklı yüzey alanlarında; farklı pH değerlerinde zeta potansiyeline bakılmıştır. Elde edilen farklı yüzey alanları uranyum içeriği yüksek atık suda denemiş ve 894 m<sup>2</sup>/g yüzey alanında ve pH 5'te iken 288,64 mg/g giderim kapasitesi tespit edilmiştir. Bu çalışmadan anlaşılıyor ki; fungusların canlı iken sahip olduğu adsorpsiyon özelliği ölü haldeyken de devam etmektedir [56].

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Atıksuların arıtılması için kullanılan yöntemlerden biri olan adsorpsiyonda adsorbanın özellikleri oldukça önemlidir. Ayrıca adsorbata uyumlu adsorbanların üretimi adsorpsiyon kapasitesi ve verimliliğini de arttırmaktadır. Üretildiği malzemenin karakterizasyonu; adsorban kapasitesinin belirlenmesinde ve verimliliğinin ortaya konulmasında adsorpsiyon uygulamasının bir önşlem ya da temel arıtım olarak kullanıp kullanılmayacağını belirler. Ayrıca ucuz ve kolay bulunabilir özellikte olmasının yanında grafen gibi dikkat çekici bir malzeme ile oluşturulan yeni nesil adsorbanların araştırılması arıtım teknolojilerine yeni bir yön kazandıracaktır. Biyolojik yapı olarak mikroorganizmaların kullanıldığı çalışmalardan anlaşıldığı üzere fungal yapılarla oluşturulan biyokompozitler üzerine adsorpsiyon çalışmaları oldukça kısıtlı olup bu konuda araştırma ve deneysel çalışmalar geliştirilmesi önem arz etmektedir. Ek olarak, bu oluşturulan biyokompozit yeşil sentez olup doğaya dost ve yeniden kullanılabilir veya doğaya zarar vermeyen yapılar içermektedir. İncelenen çalışmalarda PVP/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GO nanokompozit malzemesi en yüksek adsorban kapasitesi göstermektedir. Fakat polivinilpirolidon kullanılması doğa dostu bir yaklaşım değildir. Selülozik türevli materyaller ve selülozik atıklar kristalize yapıya sahip olması nedeniyle kolay kompozit oluşturma yeteneğine sahiptir. Literatürlerde yapılan çalışmalarda gazete kâğıtlarından oluşturulan grafen bazlı nanokompozit yapılarında ağır metal adsorpsiyonunun yüksek olması lignoselülozik atıklarla oluşturulacak nanokompozit yapıların yeni nesil ve doğa dostu adsorban özellikleri olabileceği ve bu konuda ayrıntılı çalışmaların yapılması gerektiği ortaya koymuştur.

İncelenen çalışmalardan anlaşılıyor ki; çevresel açıdan atık ve mikrobiyolojik canlılar ile nanokompozit malzemeler üretilerek adsorban kapasitesinin artırılması çevre teknolojileri alanında bilim dünyasına katkı sağlayabilir. Araştırmalar sonucunda üretilen bu nanokompozit malzemeler fabrikalarda; endüstriyel prosesler geliştirilip tasarlanarak veya bütünleşmiş sistemlere uygulanarak proaktif bir yaklaşımla temiz üretim yapılarak «sıfır atıksu çıkışı» gerçekleştirilebilir.

#### Kaynaklar

- [1] Shaffer DL, Arias Chavez LH, Ben-Sasson M, et al. Desalination and reuse of high-salinity shale gas produced water: Drivers, technologies, and future directions. *Environ Sci Technol* 2013; 47(17):9569–83.
- [2] Thines RK, Mubarak NM, Nizamuddin S, et al. Application potential of carbon nanomaterials in water and wastewater treatment: A review. *J Taiwan Inst Chem Eng* 2017; 72:116–33.



- [3] Eshaq G, ElMetwally AE. Bmim[OAc]-Cu<sub>2</sub>O/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as a multi-function catalyst for sonophotocatalytic degradation of methylene blue. *Ultrason Sonochem* 2019; 53:99–109.
- [4] Mosbah A, Chouchane H, Abdelwahed S, et al. Peptides Fixing Industrial Textile Dyes: A New Biochemical Method in Wastewater Treatment. *J Chem* 2019; 2019.
- [5] Arogunjo AM, Ofuga EE, Afolabi MA. Levels of natural radionuclides in some Nigerian cereals and tubers. *J Environ Radioact* 2005; 82(1):1–6.
- [6] Wang X, Pei Y, Lu M, et al. Highly efficient adsorption of heavy metals from wastewaters by graphene oxide-ordered mesoporous silica materials. *J Mater Sci* 2016; 50(5):2113–21.
- [7] Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J Environ Manage Elsevier Ltd* 2011; 92(3):407–18.
- [8] Kumar P, Kim KH, Bansal V, et al. Progress in the sensing techniques for heavy metal ions using nanomaterials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 2017[Online] 2017.
- [9] Saleh IA, Zouari N, Al-ghouti MA. Environmental Technology & Innovation Removal of pesticides from water and wastewater: Chemical, physical and biological treatment approaches. *Environ Technol Innov Elsevier B.V.* 2020; 19:101026.
- [10] Larsson DGJ, Pedro C de, Paxeus N. Effluent from drug manufactures contains extremely high levels of pharmaceuticals. *J Hazard Mater* 2007; 148(3):751–55.
- [11] Senthil Kumar P, Varjani SJ, Suganya S. Treatment of dye wastewater using an ultrasonic aided nanoparticle stacked activated carbon: Kinetic and isotherm modelling. *Bioresour Technol* 2018; 250:716–22.
- [12] Katheresan V, Kansedo J, Lau SY. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *J Environ Chem Eng* 2018; 6(4):4676–97.
- [13] Bensalah N, Alfaro MAQ, Martínez-Huitile CA. Electrochemical treatment of synthetic wastewaters containing Alaphazurine A dye. *Chem Eng J* 2009; 149(1–3):348–52.
- [14] Sajid M, Ilyas M, Basheer C, et al. Impact of nanoparticles on human and environment: review of toxicity factors, exposures, control strategies, and future prospects. *Environ Sci Pollut Res* 2015; 22(6):4122–43.
- [15] Ali I, Allothman ZA, Alwarthan A. Uptake of propranolol on ionic liquid iron nanocomposite adsorbent: Kinetic, thermodynamics and mechanism of adsorption. *J Mol Liq* 2017; 236:205–13.
- [16] Selvaraj M, Hai A, Banat F, et al. Application and prospects of carbon nanostructured materials in water treatment: A review. *J Water Process Eng* 2020; 33.
- [17] Ain QU, Farooq MU, Jalees MI. Application of Magnetic Graphene Oxide for Water Purification: Heavy Metals Removal and Disinfection. *J Water Process Eng Elsevier* 2020; 33(August 2019):101044.
- [18] Ali I, Basheer AA, Mbianda XY, et al. Graphene based adsorbents for remediation of noxious pollutants from wastewater. *Environ Int Elsevier* 2019; 127(January):160–80.
- [19] Singh P, Shandilya P, Raizada P, et al. Review on various strategies for enhancing photocatalytic activity of graphene based nanocomposites for water purification. *Arab J Chem King Saud University* 2020; 13(1):3498–520.
- [20] Nupearachchi CN, Mahatantila K, Vithanage M. Application of graphene for decontamination of water; Implications for sorptive removal. *Groundw Sustain Dev Elsevier* 2017; 5(June):206–15.
- [21] Ahmad SZN, Wan Salleh WN, Ismail AF, et al. Adsorptive removal of heavy metal ions using graphene-based nanomaterials: Toxicity, roles of functional groups and mechanisms. *Chemosphere Elsevier Ltd* 2020; 248:126008.
- [22] Xia MY, Xie Y, Yu CH, et al. Graphene-based nanomaterials: the promising active agents for antibiotics-independent antibacterial applications. *Journal of Controlled Release* 2019[Online] 2019.
- [23] Baig N, Ihsanullah, Sajid M, et al. Graphene-based adsorbents for the removal of toxic organic pollutants: A review. *J Environ Manage* 2019; 244(May):370–82.
- [24] Boehm HP, Setton R, Stumpp E. Nomenclature and terminology of graphite intercalation compounds. *Carbon N Y* 1986; 24(2):241–45.
- [25] Fitzer E, Köchling KH, Boehm HP, et al. Recommended terminology for the description of carbon as a solid. *Pure Appl Chem* 1995; 67(3):473–506.
- [26] Katsnelson MI. Graphene: carbon in two dimensions. *Mater Today* 2007; 10(1):20–27.
- [27] Li X, Zhu Y, Cai W, et al. Transfer of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes. *Nano Lett* 2009; 9(12):4359–63.
- [28] Stoller MD, Park S, Yanwu Z, et al. Graphene-Based ultracapacitors. *Nano Lett* 2008; 8(10):3498–502.
- [29] Moser J, Barreiro A, Bachtold A. Current-induced cleaning of graphene. *Appl Phys Lett* 2007; 91(16):1–4.
- [30] Lee E, Hong J-Y, Kang H, et al. Synthesis of TiO<sub>2</sub> nanorod-decorated graphene sheets and their highly efficient photocatalytic activities under visible-light irradiation. *J Hazard Mater* 2012; 219–220:13–18.
- [31] Tan B, Thomas NL. A review of the water barrier properties of polymer/clay and polymer/graphene nanocomposites. *J Memb Sci Elsevier* 2016; 514:595–612.
- [32] Zaaba NI, Foo KL, Hashim U, et al. Synthesis of Graphene Oxide using Modified Hummers Method: Solvent Influence. *Procedia Eng Elsevier B.V.* 2017; 184:469–77.
- [33] Pei S, Cheng H-M. The reduction of graphene oxide. *Carbon N Y* 2012; 50(9):3210–28.
- [34] Cao Y, Li X. Adsorption of graphene for the removal of inorganic pollutants in water purification: A review. *Adsorption* 2014; 20(5–6):713–27.
- [35] Tao S, Wang C, Ma W, et al. Designed multifunctionalized magnetic mesoporous microsphere for sequential sorption of

- organic and inorganic pollutants. *Microporous Mesoporous Mater Elsevier Inc.* 2012; 147(1):295–301.
- [36] Croitoru A, Ficai A, Ficai D, et al. *materials Chitosan / Graphene Oxide Nanocomposite Water Purification* 1–13.
- [37] Liang Q, Luo H, Geng J, et al. Facile one-pot preparation of nitrogen-doped ultra-light graphene oxide aerogel and its prominent adsorption performance of Cr(VI). *Chem Eng J* 2018; 338:62–71.
- [38] Guo X, Du B, Wei Q, et al. Synthesis of amino functionalized magnetic graphenes composite material and its application to remove Cr(VI), Pb(II), Hg(II), Cd(II) and Ni(II) from contaminated water. *J Hazard Mater* 2014; 278:211–20.
- [39] Wu L, Qin Z, Yu F, et al. Graphene oxide cross-linked chitosan nanocomposite adsorbents for the removal of Cr(VI) from aqueous environments. *Desalin Water Treat* 2017; 72:300–07.
- [40] Yu Z, Chen Q, Lv L, et al. Attached  $\beta$ -cyclodextrin/ $\gamma$ -(2,3-epoxypropoxy) propyl trimethoxysilane to graphene oxide and its application in copper removal. *Water Sci Technol* 2017; 75(10):2403–11.
- [41] Tran HV, Tran TL, Le TD, et al. Graphene oxide enhanced adsorption capacity of chitosan/magnetite nanocomposite for Cr(VI) removal from aqueous solution. *Mater Res Express* 2019; 6(2).
- [42] Wang X, Lu J, Cao B, et al. Facile synthesis of recycling Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene adsorbents with potassium humate for Cr(VI) removal. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp* 2019; 560:384–92.
- [43] Wang Z, Lin F, Huang L, et al. Cyclodextrin functionalized 3D-graphene for the removal of Cr(VI) with the easy and rapid separation strategy. *Environ Pollut* 2019; 254:112854.
- [44] Tran LT, Tran HV, Le TD, et al. Studying Ni(II) adsorption of magnetite/graphene oxide/chitosan nanocomposite. *Adv Polym Technol* 2019; 2019.
- [45] Yap PL, Auyoong YL, Hassan K, et al. Multithiol functionalized graphene bio-sponge via photoinitiated thiol-ene click chemistry for efficient heavy metal ions adsorption. *Chem Eng J Elsevier* 2020; 395(April):124965.
- [46] Deng J-H, Zhang X-R, Zeng G-M, et al. Simultaneous removal of Cd(II) and ionic dyes from aqueous solution using magnetic graphene oxide nanocomposite as an adsorbent. *Chem Eng J* 2013; 226:189–200.
- [47] Liu J, Du H, Yuan S, et al. Synthesis of thiol-functionalized magnetic graphene as adsorbent for Cd(II) removal from aqueous systems. *J Environ Chem Eng* 2015; 3(2):617–21.
- [48] Wan S, Ding W, Wang Y, et al. Manganese oxide nanoparticles impregnated graphene oxide aggregates for cadmium and copper remediation. *Chem Eng J* 2018; 350:1135–43.
- [49] Wei J, Aly Aboud MF, Shakir I, et al. Graphene Oxide-Supported Organo-Montmorillonite Composites for the Removal of Pb(II), Cd(II), and As(V) Contaminants from Water. *ACS Appl Nano Mater* 2020; 3(1):806–13.
- [50] Yang B, Wei Y, Liu Q, et al. Polyvinylpyrrolidone functionalized magnetic graphene-based composites for highly efficient removal of lead from wastewater. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp Elsevier* 2019; 582(July):123927.
- [51] Cui L, Wang Y, Gao L, et al. EDTA functionalized magnetic graphene oxide for removal of Pb(II), Hg(II) and Cu(II) in water treatment: Adsorption mechanism and separation property. *Chem Eng J* 2015; 281:1–10.
- [52] Shahzad A, Miran W, Rasool K, et al. Heavy metals removal by EDTA-functionalized chitosan graphene oxide nanocomposites. *RSC Adv* 2017; 7(16):9764–71.
- [53] Zeng WJ, Wang CY, Wang YH, et al. Facile synthesis of graphene oxide/palygorskite composites for Pb(II) rapid removal from aqueous solutions. *Water Sci Technol* 2019; 80(5):989–97.
- [54] Lai KC, Lee LY, Hiew BYZ, et al. Facile synthesis of xanthan biopolymer integrated 3D hierarchical graphene oxide/titanium dioxide composite for adsorptive lead removal in wastewater. *Bioresour Technol* 2020; 309:123296.
- [55] Zhu W, Lei J, Li Y, et al. Procedural growth of fungal hyphae/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/graphene oxide as ordered-structure composites for water purification. *Chem Eng J* 2019;
- [56] Li Y, Zou G, Yang S, et al. Bioassembly of fungal hyphae/graphene oxide composite as high performance adsorbents for U(VI) removal. *Appl Surf Sci* 2018;
- [57] Wang Z, Zhao D, Wu C, et al. Magnetic metal organic frameworks/graphene oxide adsorbent for the removal of U(VI) from aqueous solution. *Appl Radiat Isot Elsevier Ltd* 2020; 162(September 2019):109160.
- [58] Zhao D, Wang Y, Zhao S, et al. A simple method for preparing ultra-light graphene aerogel for rapid removal of U(VI) from aqueous solution. *Environ Pollut* 2019; 251:547–54.
- [59] Xue G, Luo X, Srinivasakannan C, et al. Effective removal of organic dye and heavy metal from wastewater by tourmaline/graphene oxide composite nano material. *Mater Res Express IOP Publishing* 2019; 6(11).
- [60] Sadeghi MH, Tofighy MA, Mohammadi T. One-dimensional graphene for efficient aqueous heavy metal adsorption: Rapid removal of arsenic and mercury ions by graphene oxide nanoribbons (GONRs). *Chemosphere* 2020; 253.
- [61] Zhou C, Zhu H, Wang Q, et al. Adsorption of mercury(ii) with an Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic polypyrrole-graphene oxide nanocomposite. *RSC Adv* 2017; 7(30):18466–79.
- [62] Zhao L, Yu B, Xue F, et al. Facile hydrothermal preparation of recyclable S-doped graphene sponge for Cu<sup>2+</sup> adsorption. *J Hazard Mater* 2015; 286:449–56.
- [63] Wan S, Ding W, Wang Y, et al. Manganese oxide nanoparticles impregnated graphene oxide aggregates for cadmium and copper remediation. *Chem Eng J* 2018; 350:1135–43.
- [64] Yang X, Wan Y, Zheng Y, et al. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: A critical review. *Chem Eng J Elsevier* 2019; 366(February):608–21.
- [65] Chen H, Meng Y, Jia S, et al. Graphene oxide modified waste newspaper for removal of heavy metal ions and its application in industrial wastewater. *Mater Chem Phys* 2020; 244:122692.



## St-37 Malzemesinin Lazer ile Kesme İşleminde Seçilen Parametrelerin Etkisinin Deneysel ve İstatiksel Olarak İncelenmesi

Rümeysa IŞIK<sup>1</sup>, Barış ÖZLÜ<sup>2\*</sup>, Halil DEMİR<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> İmalat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

<sup>2\*</sup> Makine Bölüm, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye

<sup>1</sup>rumeysaa.03@hotmail.com , <sup>2\*</sup>barisozlu@aksaray.edu.tr, <sup>3</sup>hdemir@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 14/07/2020;

Kabul/Accepted: 15/10/2020)

**Öz:** Deneysel çalışmada, St-37 malzemesinin lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğünü (Ra) ve kerf genişliğini (kW) etkileyen parametreler deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Lazer kesme deneylerinin maliyetini azaltmak için lazer kesme parametrelerinin tasarımı Taguchi L32 (2x4x4) dikey dizilimine göre oluşturulmuştur. Lazer kesme parametreleri olarak iki farklı frekans (2500 Hz ve 3500 Hz), dört farklı gaz basıncı (0,8 bar, 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar) ve dört farklı kesme hızı (10 mm/s, 16 mm/s, 22 mm/s ve 28 mm/s) belirlenmiştir. Lazer kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerine etkilerinin incelenmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı, varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için optimum seviyeler sırası ile A2B1C4 ve A1B1C4 olarak bulunmuştur. Varyans analiz sonuçları %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiş olup yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için en etkili parametrenin sırası ile % 55,78 ile frekans ve % 54,26 gaz basıncı olduğu belirlenmiştir. Regresyon analizleri incelendiğinde ise yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için oluşturulan matematiksel modelinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için belirleme katsayısı (R2) değeri sırasıyla % 88,28 ve % 91,81 olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** St-37 malzeme, lazer kesme, yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği, Taguchi.

### Experimental and Statistical Investigation of the Effect of the Parameters Selected in Cutting Process with Laser St-37 Material

**Abstract:** In the experimental study, the laser cutting parameters affecting the surface roughness (Ra) and kerf width (kW) of the St37 material during laser cutting were investigated experimentally and statistically. To reduce the cost of laser cutting experiments, the design of laser cutting parameters was created according to the Taguchi L32 (2x4x4) vertical array. Two different frequencies (2500 Hz and 3500 Hz), four different gas pressures (0.8 bar, 0.9 bar, 1 bar and 1.1 bar) and four different cutting speeds (10 mm/s, 16 mm/s, 22 mm/s and 28 mm/s) were determined as laser cutting parameters. Signal/Noise (S/N) ratio, variance analysis (ANOVA) and regression analysis were used to examine the effects of laser cutting parameters on surface roughness and kerf width. As a result of the study, optimum levels for surface roughness and kerf width were found as A2B1C4 and A1B1C4, respectively. Variance analysis results were carried out at 95% confidence level, the most effective parameter for surface roughness and kerf width was determined to be 55.78%, frequency and 54.26% gas pressure, respectively. When the regression analysis is examined, the coefficient of determination (R2) value for the surface roughness and kerf width of the mathematical model created for the surface roughness and kerf width was determined as 88.28% and 91.81%, respectively.

**Key words:** St-37 material, laser cutting, surface roughness, kerf width, Taguchi.

#### 1. Giriş

Gelişmiş işleme yöntemleri arasında lazer kesim, çok farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılan en yaygın termal bazlı işleme yöntemlerinden biri olarak metal endüstrisinde yerini almaktadır. Lazer işleme teknolojisi, kullanım kolaylığı, yüksek hassasiyet, düşük maliyet, yüksek parça kalitesi, yüksek işleme hızı ve daha az parça fitesi nedeniyle imalat endüstrisinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özelliklere ilaveten, temassız olarak kesilmesi zor malzemeler, kırılğan malzemeler, iletken ve iletken olmayan malzemeler, yumuşak ve ince malzemeler gibi gelişmiş mühendislik malzemelerin işlenmesi için kullanılmaktadır [1-3]. Bununla birlikte lazerle işleme sırasında, kesme bölgesinde iş parçası yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Yüksek ısıya maruz kalan bölgelerde aşırı termal gerilmelerin oluşması parça kalitesinin düşmesine neden olmaktadır [4]. Lazer işleme sürecinde, parça yüzeyi boyunca odaklanan lazer ışımı, malzeme ergitilene kadar hızlı bir şekilde ısınmasına neden

\* Sorumlu yazar: [barisozlu@aksaray.edu.tr](mailto:barisozlu@aksaray.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7351-2902, <sup>2</sup> 0000-0002-8594-1234, <sup>3</sup> 0000-0002-9802-083X

olmaktadır. Erimiş metal daha sonra yüksek basınçlı bir gaz yardımıyla işleme bölgesinden uzaklaştırılarak kesilmiş dar bir kerf genişliği oluşturmaktadır [5]. Lazer kesme işlemi sırasında iş parçasında meydana gelen boşluğa kerf genişliği denilmektedir. Kerf genişliği iş parçasından çıkarılan malzemeyi göstermekte ve çıkarılan malzeme atık malzeme olacağından kerf genişliğinin daima küçük olması istenmektedir. Ayrıca alt kerf genişliği genelde üst kerf genişliğinden daha dar bir ölçüye sahip olmaktadır [6].

Lazer işleme teknolojisinde, lazer işleme sürecinin ve üretilen parçanın kalitesini etkileyen işleme parametrelerinin daha iyi anlaşılması için birçok teorik ve deneysel araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. 0,7 mm kalınlığındaki IS 737 (40800 kalite) alüminyum alaşımlı düz sac malzemenin lazer kesimi sırasında kesim kalitesini etkileyen parametreleri araştırmıştır. Çalışmada parametrelerin modellenmesi için Taguchi ve tepki yüzeyi modeli kullanılmıştır. Lazer işleme parametresi olarak oksijen basıncı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesme hızı tanımlanmıştır. Regresyon sonuçlarına göre işleme parametrelerinin Taguchi ve tepki yüzeyi model için anlamlı olduğunu, tepki yüzeyi modelinde darbe genişliği ve darbe frekansının kerf koniği üzerinde diğer parametrelere göre daha az etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kerf koniği için frekans değerinin etkisinin daha az olduğu belirlenirken, yüzey pürüzlülüğü için etkin parametrenin gaz basıncı olduğu belirlenmiştir [7]. Thawari ve arkadaşları, 1 mm kalınlığında Hastelloy-X süper alaşım sac malzemenin lazer kesimi sırasındaki anahtar işlem parametrelerinin etkisini incelemiştir. Lazer işleme parametresi olarak darbe enerjisi, darbe frekansı, darbe süresi ve kesme hızı kullanılmıştır. Lazer kesme işleminde, malzeme kalınlığı için lazer işleme parametresi olarak darbe enerjisi ve kesme hızı kombinasyonu kullanılmaktadır. Ayrıca darbe süresi lazer kesiminde hayati bir rol oynamaktadır. Çalışmanın sonucunda frekans değeri arttıkça kerf genişliğinin arttığı, daha kısa darbe süresi, daha uzun süreli darbeye kıyasla daha düşük kerf koniği ile genişliğe neden olduğu belirlenmiştir [8]. Çaydaş ve Haşçalık yaptıkları çalışmada, gri ilişkisel analize dayanan çoklu performans özelliklerine sahip St-37 çeliğin lazer kesim işleminin optimizasyonu için etkili bir yaklaşım sunmuştur. Deney tasarımıdaki en iyi faktör seviyesini belirlemek için Taguchi yöntemine dayanan L16 dikey dizini kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Lazer ile işlemede kullandıkları parametreleri dört farklı güç ve dört farklı kesme hızı olarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve ısıdan etkilenen bölgenin genişliği gibi performans özelliklerinin bu çalışma tarafından önerilen yöntem kullanılarak iyileştirildiği belirlenmişlerdir [9]. Madic ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 2 mm kalınlığındaki DIN S355J2G3 sac malzeme CO<sub>2</sub> lazer kesiminde yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için Taguchi yöntemi kullanmıştır. Deneylerde işleme parametreleri olarak kesme hızı, lazer gücü ve gaz basıncı seçilmiştir. Deney tasarımı Taguchi'nin L25 dikey dizisine göre tasarlanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, kesme hızının ve gaz basıncının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametreler olduğu, lazer gücünün etkisinin ise yüzey pürüzlülüğüne etkisinin çok daha az olduğu belirlenmiştir [3]. Pandey ve Dubey, 1,4 mm kalınlığındaki titanyum alaşımlı sacın (Ti-6Al-4V) lazer kesim işleminde kerf konikliği ve yüzey pürüzlülüğünü en aza indirerek geometrik doğruluğu ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla lazer işleme davranışını incelemiştir. Lazer kesme parametresi olarak gaz basıncı, darbe genişliği, frekansı ve kesme hızı değerleri kullanılmıştır. Taguchi L27 dikey dizi deney tasarımı yapılarak elde edilen veriler, kerf koniği ve yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağı tabanlı modellerinin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Sonuç olarak, yapay sinir ağı tabanlı modellerin öngördüğü kerf konikliği ve yüzey pürüzlülük değerleri, deneysel değerlere yakın bulunmuştur. Ayrıca yaptıkları çalışmada kerf genişliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün azaltıldığı belirtilmişlerdir [10]. Dautam ve Mishra yaptıkları çalışmada, 1,6 mm kalınlığında bazalt elyaf takviyeli polimer malzemenin geometrik olarak doğru lazer kesim sağlayabilen optimum kesme parametreleri düzeylerini belirlemeyi amaçlamıştır. Deney tasarımı yanıt yüzey yöntemi Box-Behnken tasarımı ile yapılmıştır. Lazer kesme parametresi olarak ışık akımı, darbe genişliği, darbe frekansı, basınç ve kesme hızı kullanılmıştır. Kerf genişliği, kerf sapması ve kerf konikliği için ikinci dereceden matematiksel modelleri başarılı bir şekilde geliştirilmiş ve farklı kerf kalitesi karakteristiklerinin tahmini için yeterli güven seviyesinde bulunmuştur. ANOVA analizinde ışık akımı, kerf genişliği ve kerf konikliği için en önemli bir faktör iken kesim hızı kerf sapması için en önemli faktör olarak belirlenmiştir. Tüm deneylerde daha düşük basınç ve kesme hızlarında minimum kerf oranını bulmuştur [11]. Karthikeyan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, yumuşak çeliklerin lazerle kesilmesinde kerf genişliğini ve kerf oranını en aza indirmeye çalışılmıştır. Lazer işleme deneyleri için parametrelerinin tasarımında Box-Behnken yöntemi kullanmışlardır. Deney parametresi olarak kesme hızı, güç ve basınç dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler gri ilişkisel analizinde uygulanmış ve her bir parametrenin anlamlı katkısını bulmak ve minimum kerf kalitesi için optimum parametreleri tahmin etmek için gri ilişkisel dereceleri hesaplanmıştır. Sonuçlardan, gücün diğer faktörlere göre en önemli faktör olduğu ve optimum durumun 1 kW güç, 1,3 m/dak kesme hızı ve 0,15 bar basınç olduğu tespit edilmiştir. Kerf oranı tüm deneyler için daha düşük basınç ve kesme hızlarında minimum kerf oranına ulaşmıştır [12].

Yapılan literatür araştırmasında, lazer ile kesme işlemlerinde kullanılan parametrelerin parça kalitesi üzerine etkisi ile ilgili çalışmaların devam ettiği görülmüştür. Bu çalışmada, 4 mm kalınlığındaki St-37 malzemenin lazerle

kesme işlenmesinde frekans, basınç ve kesme hızı gibi seçilen parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne ve kerf genişliğine olan etkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir.

## 2. Deneysel Metot

Deneylerde, inşaat ve iş makinalarının, kara ve demir yolu araçlarının, konteynırların, basınçlı kapların, LPG tanklarının imalatında yaygın olarak kullanılan St-37 sac malzeme kullanılmıştır. Dumet Demir, Metal SAN. TİC. LTD. ŞTİ. firmadan temin edilen St-37 sac malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deney numunelerinin kimyasal bileşimi (%).

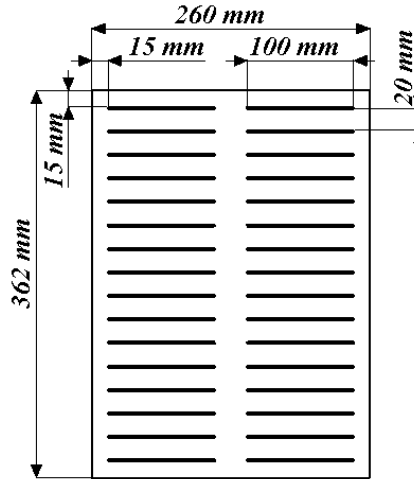
Malzeme	Element (%)						Fe
	C	Si	Mn	P	S	N	
St-37	0,17	0,40	0,50	0,05	0,06	0,007	Denge

Lazer işleme deneyleri 800 W gücü sahip SUNTOP ST-FC3015 marka üç eksenli CNC lazer kesim tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan lazer kesim tezgâhının teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Lazer kesimin uygulandığı tezgâhın teknik özellikleri.

Tezgâh Parametreleri	Değerler
Maksimum lazer gücü	800 W
Lazer dalga boyu	1064 nm
Etkili işleme alanı	1500x3000 mm
X, Y eksenli konumlandırma hassasiyeti	$\pm 0,03$ mm
X, Y maksimum aksenal ivmelenme	1 g
Tüketilen toplam güç	$\leq 8$ kW

Deneylerin gerçekleştirilmesi esnasında kesilen yüzeylerin incelenmesinde karışıklık olmaması için deney tasarımı CAD programında tasarlanış ve yerleşim planı yapılmıştır. Yerleşim planı yapılarak kesilecek numunelerin ölçüleri Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Deneylerde kullanılacak numunenin ölçüleri ve yerleşim planı.

Deneyler sonucunda meydana gelen kerf genişliğinin ölçümlerinde Insize marka ISM-PM200SA dijital mikroskop kullanılmıştır. Kerf genişlikleri kesme boyunca dört farklı noktadan yapılarak ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Kesilen numunelerin yüzeylerinin pürüzlülük değerleri Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler her numunenin işlenmiş yüzeylerinin dört farklı noktasından alınan sonuçların aritmetik ortalaması hesaplanarak bulunmuştur.

### 3. Deneysel Tasarım

Mühendislik malzemelerinin lazerle işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğini doğrudan etkileyecek olan etkin işleme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için Taguchi yöntemi, lazer işleme operasyonlarında işleme parametrelerinin belirlenmesinde deney parametrelerinin sayısını önemli derecede azaltmada ve uygun işleme koşullarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir [13-14]. Taguchi yöntemi geleneksel olarak hazırlanan deney parametrelerinin dikkate alınmadığı ve kontrol edilemeyen faktörlerin oluşturduğu değişkenlerin kontrolüne izin vermektedir. Kontrol faktörü seviyelerinin bu faktörlere karşı performans özelliklerini ölçmek için, Taguchi yöntemi amaç fonksiyon değerlerini bir sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürmektedir. S/N oranı, deneysel verilerin kalite özelliklerini gösteren istenmeyen rasgele gürültü değeri için istenen sinyal oranı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, ANOVA işleme parametrelerinin istatistiksel önemini ortaya çıkarmak için kullanılmaktadır. Böylelikle işleme parametrelerinin en iyi şartlarının belirlenmesi ANOVA ve S/N oranı yardımıyla hesaplanmaktadır [15-19].

Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kerf genişliğinin belirlenmesi için kontrol faktörleri için verilen her bir deney kombinasyonu için deneyler yapıldı. Yapılan çalışmada S/N değerlerinin tespit edilmesinde ve işleme verimliliği için yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerinin en küçük olması istenildiği için Denklem (1)'de verilen "en küçük en iyi" prensibine karşılık gelen formül kullanılmaktadır[20]. Formülde,  $y_i^2$ , ölçüm sonuçlarının toplamının karesi, n ise toplam deney sayısıdır. Lazer işleme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 3'de verilmektedir.

$$\text{En küçük en iyi: } \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

**Tablo 3.** Lazer işleme deneyleri kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Sembol	Kontrol Faktörleri	Seviye			
		1	2	3	4
A	Frekans (Hz)	2500	3500	-	-
B	Basınç (Bar)	0,8	0,9	1	1,1
C	Kesme Hızı (mm/s)	10	16	22	28

## 4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

### 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği

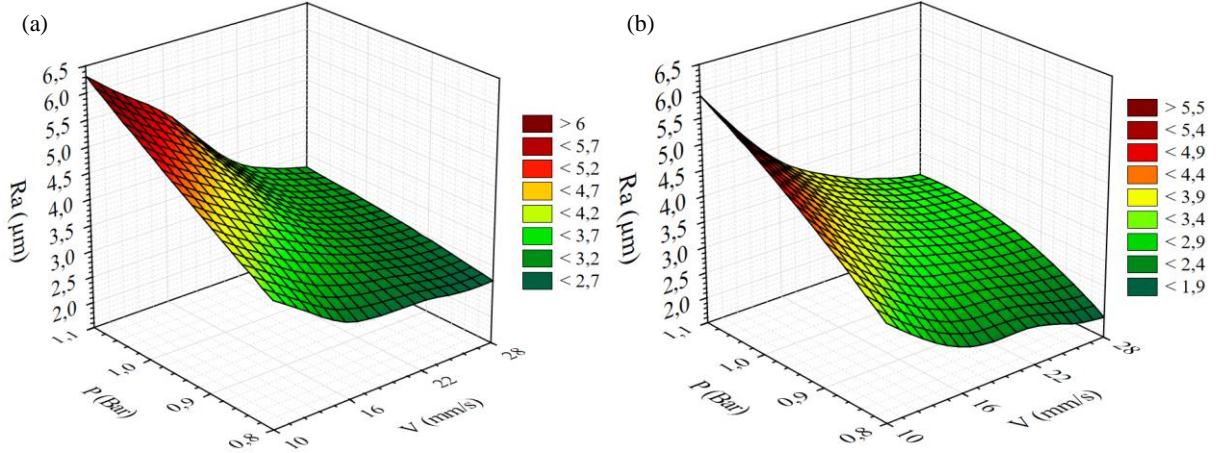
Yapılan çalışmada St-37 sac malzemesinin lazer işleme deneyleri için hazırlanan deney tasarımında yer alan her bir kombinasyon için deneyler yapılmış ve sonuçları Tablo 4'de verilmektedir. Deneyler sonucunda lazer işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine etkisi Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterilmektedir.

Şekil 2 (a) ve (b)'de lazer ile kesilen numunelerin kesme işlemi sonucunda kesme parametrelerine bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimleri sunulmaktadır. Şekil 2 (a) incelendiğinde, 2500 Hz frekans değerinde 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü 3,98  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. 10 mm/s kesme hızında gaz basıncının sırası ile 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar kadar artırılması ile yüzey pürüzlülük değerleri sırası ile ortalama % 10,3 (4,39  $\mu\text{m}$ ), % 43,72 (5,72  $\mu\text{m}$ ) ve % 56,28 (6,22  $\mu\text{m}$ ) oranlarında artış olmaktadır. Kesme hızının 10 mm/s'den sonra düzenli olarak 28 mm/s kesme hızına kadar artırılması ile bütün gaz basıncı değerlerinde yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük değerlerinde azalmanın olduğu görülmüştür. 28 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan deneyde 2,69  $\mu\text{m}$  ile en düşük yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır. 0,8 bar gaz basıncında ve 28 mm/s kesme hızında yapılan deneye göre 0,9 bar ve 1 bar gaz basıncında yapılan deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ortalama % 12,45 oranında ve 1,1 bar gaz basıncında yapılan deneyde % 21,2 (3,26  $\mu\text{m}$ ) oranında artış olduğu görülmektedir. 3500 Hz frekans değerlerinde kesme hızı ve gaz basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 2 (b)'de verilmektedir. 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük değeri 3,39  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,8 bar'dan 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değerleri sırası ile ortalama % 27,14 (4,31  $\mu\text{m}$ ), % 53,68 (5,21  $\mu\text{m}$ ) ve % 74,34 (5,91  $\mu\text{m}$ ) oranlarında artış olduğu belirlenmiştir. Kesme hızının 28 mm/s kadar artırılması ile 0,8 bar gaz basıncında 1,86  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülük değeri ile en düşük pürüzlülük değeri ölçülmüştür. 28 mm/s kesme hızında gaz basıncının 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar kadar artırılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük değeri 0,8 bar gaz basıncına göre sırası ile % 43, % 55,38 ve % 64,5 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2 (a) ve (b) incelendiğinde gaz basıncının azaltılması, frekans değerlerinin ve kesme hızının artırılması ile yapılan

deneylerde yüzey pürüzlüğünün azaldığı görülmüştür. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarla literatürde yapılan çalışmaların sonuçları paralellik göstermektedir [21-23].

**Tablo 4.** Lazer kesme deneylerin sonuçları.

Kontrol Faktörleri						Kontrol Faktörleri					
Deney No	A			Ra ( $\mu\text{m}$ )	KG (mm)	Deney No	A			Ra ( $\mu\text{m}$ )	KG (mm)
	Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)				Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)		
1	2500	0,8	10	3,98	0,36	17	3500	0,8	10	3,39	0,37
2	2500	0,8	16	2,86	0,28	18	3500	0,8	16	2,39	0,33
3	2500	0,8	22	2,89	0,27	19	3500	0,8	22	2,26	0,29
4	2500	0,8	28	2,69	0,23	20	3500	0,8	28	1,86	0,26
5	2500	0,9	10	4,39	0,39	21	3500	0,9	10	4,31	0,41
6	2500	0,9	16	3,89	0,33	22	3500	0,9	16	3,20	0,35
7	2500	0,9	22	3,14	0,28	23	3500	0,9	22	2,90	0,36
8	2500	0,9	28	2,96	0,27	24	3500	0,9	28	2,66	0,29
9	2500	1,0	10	5,72	0,45	25	3500	1,0	10	5,21	0,48
10	2500	1,0	16	4,42	0,41	26	3500	1,0	16	3,86	0,36
11	2500	1,0	22	3,53	0,43	27	3500	1,0	22	3,09	0,37
12	2500	1,0	28	3,09	0,31	28	3500	1,0	28	2,89	0,33
13	2500	1,1	10	6,22	0,49	29	3500	1,1	10	5,91	0,52
14	2500	1,1	16	5,31	0,46	30	3500	1,1	16	4,21	0,47
15	2500	1,1	22	3,72	0,41	31	3500	1,1	22	3,44	0,46
16	2500	1,1	28	3,26	0,36	32	3500	1,1	28	3,06	0,38



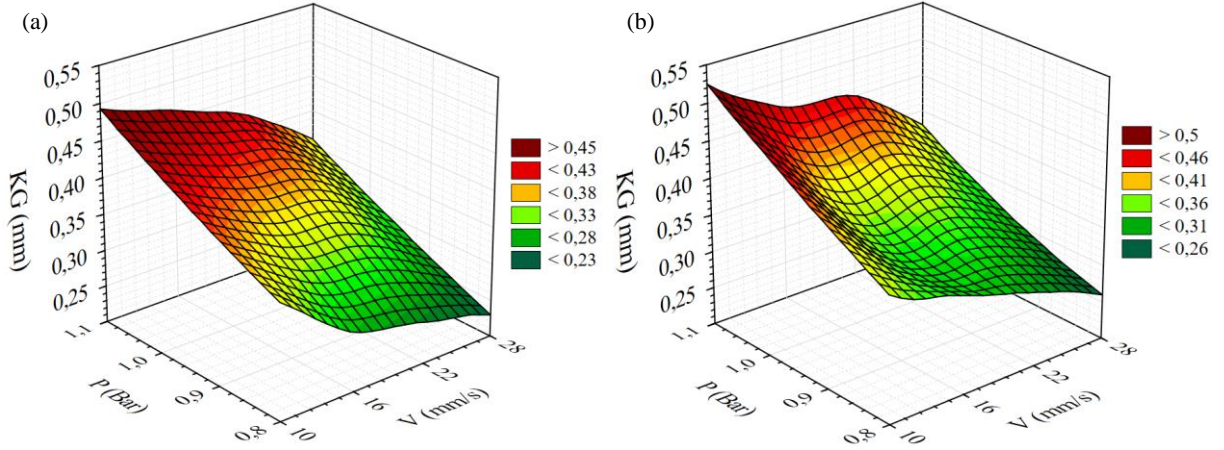
**Şekil 2.** St 37 sac malzemenin lazer kesme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlüğüne etkisi.

(a) 2500 Hz (b) 3500 Hz

Lazer kesme deneyleri iki farklı frekans değerinde, dört farklı kesme hızı ve dört farklı gaz basıncında gerçekleştirilmiş ve deneyler sonucu lazer kesme parametrelerinin kerf genişliğine etkisi Şekil 3 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Yapılan lazer deneyleri esnasında kesmenin başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar kerf genişliğinin ölçümünde ölçüm değerlerinin arttığı bu durumun ise kesme boyunca iş parçası üzerinde biriken ısının ve lazer ışığında meydana gelen sapmaların bir sonucu olarak oluştuğu düşünülmektedir [23-24]. Şekil 3 (a)'da 2500 Hz frekans değerinde 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında kerf genişliği 0,36 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 1,1 bar çıkarılması ile kerf genişliği % 36,1 oranında artarak 0,49 mm olmuştur. 0,8 bar gaz basıncında kesme hızının 10 mm/s'den düzenli olarak artırılarak 28 mm/s çıkarılmasıyla 0,23 mm ile en düşük kerf genişliği ölçülmüştür. 28 mm/s kesme hızında gaz basıncının 1,1 bar çıkarılmasıyla kerf genişliği artmış ve 0,29 mm ölçülmüştür. Şekil 3 (b)'de incelendiğinde, 3500 Hz frekans değerinde 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan lazer kesme deneylerinde kerf genişliği 0,37 mm ölçülmüştür. 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan lazer kesme deneyleri sonrası gaz basıncının düzenli olarak 1,1 bar kadar



artırılmasıyla kerf genişliği % 40,54 ( 0,52 mm) artma görülmüştür. 0,8 bar gaz basıncında ve 10 mm/s kesme hızında yapılan deney sonrası gaz basıncının sabit kalması ile kesme hızının 28 mm/s'ye çıkarılması ile kerf genişliği 0,26 mm olmuştur. 28 mm/s kesme hızında gaz basıncının 1,1 bar'a çıkartılması ile kerf genişliği 0,38 mm ölçülmüştür. Kesme hızının azalması ve gaz basıncının artması ile kerf genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Gaz basıncının artması ile kesme bölgesinden daha fazla ergimiş malzeme uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca düşük kesme hızlarında birim zamandaki lazer ışınının kesme bölgesindeki etki süresi artacağından oluşan ısı kesme bölgesinde yoğunlaşacak ve daha fazla miktarda malzeme ergiteceğinden kerf genişliğini artıracaktır [24-25].



Şekil 3. St 37 sac malzemenin lazer kesme işleminde kesme parametrelerinin kerf genişliğine etkisi. (a) 2500 Hz (b) 3500 Hz

#### 4.2 Sinyal/gürültü analizi (S/N)

Deney tasarımındaki deneyler yapılarak kontrol faktörleri ile yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği sonuçlarının etkileşimleri incelenmiştir. Kontrol faktörlerinin optimizasyonunda sinyal/gürültü (S/N) analizi kullanılmıştır. Lazer kesme sonrası düşük yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerleri, ürünün kalitesini artırmak ve üretim maliyetinin azaltmak için çok önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için sinyal/gürültü (S/N) analizi yanıt tablosu Tablo 6'de verilmiştir. Lazer kesme deneyleri sonucunda, yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerlerinin ortalamaları sırası ile 3,64  $\mu\text{m}$  ve 0,36 mm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerleri için ortalama sinyal / gürültü (S/N) değerleri sırası ile -10,88 dB ve 8,87 dB olarak hesaplanmıştır.

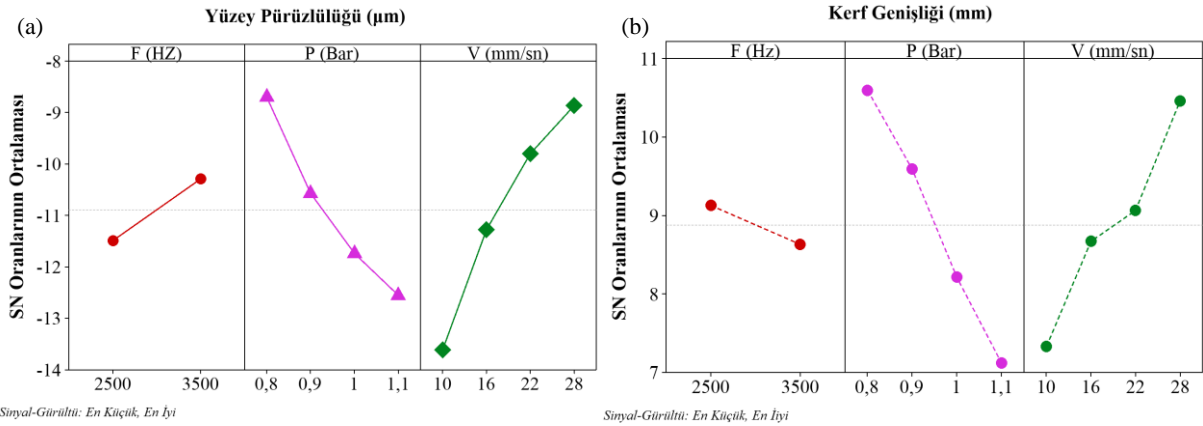
S/N yanıt tablosu kullanılarak her bir kontrol faktörünün yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerine etkilerinin analizleri yapılmıştır. Tablo 5'da yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için S/N tahminleri sunulmuştur. Taguchi yöntemi ile en iyi yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerleri için en iyi kesme parametreleri düzeylerini göstermektedir. Buna göre en iyi yüzey pürüzlülüğü için kesme parametreleri A (seviye 2, S/N=-10,289), B (seviye 1, S/N=-8,698) ve C (seviye 4, S/N=-8,863) olmuştur. Buna göre 3500 Hz frekans, 0,8 basınç ve 28 mm/s kesme hızında en iyi kesme parametrelerinde en iyi yüzey pürüzlülüğü 1,86  $\mu\text{m}$  olmuştur. Benzer şekilde, en iyi kerf genişliği için kesme parametreleri A (seviye 1, S/N=9,128), B (seviye 1, S/N=10,598) ve C (seviye 4, S/N=10,459) olmuştur. Buna göre 2500 Hz frekans, 0,8 basınç ve 28 mm/s kesme hızında en iyi kesme parametrelerinde en iyi kerf genişliği 0,23 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4'de lazer kesme işleminde kesme parametrelerinin S/N oranları görülmektedir.

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için S/N yanıt tablosu.

Seviye	Yüzey Pürüzlülüğü			Seviye	Kerf Genişliği		
	Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)		Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)
1	-11,488	<b>-8,698</b>	-13,617	1	<b>9,128</b>	<b>10,598</b>	7,327
2	<b>-10,289</b>	-10,569	-11,278	2	8,632	9,591	8,670
3	-11,737	-9,798	-9,798	3		8,212	9,064
4		-12,552	<b>-8,863</b>	4		7,118	<b>10,459</b>
Delta	1,199	3,854	4,754	Delta	0,496	3,480	3,131

**Tablo 6.** Lazer kesme deneylerinin sonuçları ve S/N oranları.

Deney No	Kontrol Faktörleri			Ra için S/N Oranı (dB)	KG için S/N Oranı (dB)	Tahmini Ra ( $\mu\text{m}$ )	Tahmini Kerf Genişliği (mm)
	A Frekans (Hz)	B Basınç (Bar)	C Kesme Hızı (mm/s)				
1	2500	0,8	10	-11,9977	8,8739	3,9540	0,3493
2	2500	0,8	16	-9,1273	11,0568	3,0603	0,2968
3	2500	0,8	22	-9,2180	11,3727	2,8565	0,2643
4	2500	0,8	28	-8,5950	12,7654	2,5490	0,2293
5	2500	0,9	10	-12,8493	8,1787	4,4678	0,3806
6	2500	0,9	16	-11,7990	9,6297	3,8290	0,3281
7	2500	0,9	22	-9,9386	11,0568	3,1503	0,3006
8	2500	0,9	28	-9,4258	11,3727	2,9328	0,2607
9	2500	1,0	10	-15,1479	6,9357	5,6328	0,4706
10	2500	1,0	16	-12,9084	7,7443	4,4740	0,3981
11	2500	1,0	22	-10,9555	7,3306	3,4903	0,4056
12	2500	1,0	28	-9,7992	10,1728	3,1628	0,3256
13	2500	1,1	10	-15,8758	6,1961	6,2553	0,4893
14	2500	1,1	16	-14,5019	6,7448	5,1165	0,4568
15	2500	1,1	22	-11,4109	7,7443	3,7828	0,4193
16	2500	1,1	28	-10,2644	8,8739	3,3553	0,3543
17	3500	0,8	10	-10,6040	8,6360	3,4159	0,3806
18	3500	0,8	16	-7,5680	9,6297	2,1896	0,3131
19	3500	0,8	22	-7,0822	10,7520	2,2934	0,2956
20	3500	0,8	28	-5,3903	11,7005	2,0009	0,2606
21	3500	0,9	10	-12,6895	7,7443	4,2321	0,4193
22	3500	0,9	16	-10,1030	9,1186	3,2609	0,3518
23	3500	0,9	22	-9,2480	8,8739	2,8896	0,3393
24	3500	0,9	28	-8,4976	10,7520	2,6871	0,2993
25	3500	1,0	10	-14,3368	6,3752	5,2971	0,4593
26	3500	1,0	16	-11,7317	8,8739	3,8059	0,3718
27	3500	1,0	22	-9,7992	8,6360	3,1296	0,3943
28	3500	1,0	28	-9,2180	9,6297	2,8171	0,3143
29	3500	1,1	10	-15,4317	5,6799	5,8746	0,5206
30	3500	1,1	16	-12,4856	6,5580	4,4034	0,4731
31	3500	1,1	22	-10,7312	6,7448	3,3771	0,4506
32	3500	1,1	28	-9,7144	8,4043	2,9646	0,3856

**Şekil 4.** St 37 sac malzemenin lazer kesme işleminde kontrol faktörlerinin, (a) yüzey pürüzlülüğü ve (b) kerf genişliğine etkisi.

### 4.3. Varyans analizi (ANOVA)

Lazer kesme deneylerinde kullanılan kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine katkısını değerlendirmek için varyans analizi (ANOVA) yöntemi kullanılmış ve sonuçları Tablo 7’de sunulmuştur. Varyans analizi % 95 güven ve %5 anlamlılık düzeyinde yapılmıştır. P değeri 0,05’den küçük değerler için anlamlı olduğunu gösterir, eğer P değeri 0,05’den büyükse deneylerde kullanılan parametrelerin bir etkisi olmadığı düşünülür [26]. Burada, her bir değişkenin sonuçlar üzerindeki anlamlılık düzeyin gösteren P değerleri ile toplam serbestlik derecesi (DF), ardışık kareler toplamı (Seq SS), düzeltilmiş kareler toplamı (Adj SS), ayarlanmış ortalama kareler (Adj MS), F değerleri ve yüzde katkı oranları görülmektedir. ANOVA yönteminde kontrol faktörlerinin çıktı üzerine en fazla etki edeni belirlemek için F değeri en büyük olan dikkate alınır [15]. Tablo 7’de, lazer kesme işlemlerinde kontrol faktörleri için yapılan varyans analizi sonucu frekansın, basıncın ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerine yüzde katkı oranları sırası ile % 55,78, % 31,68 ve % 4,73 olmuştur. Ayrıca frekansın, basıncın ve kesme hızının kerf genişliği sonuçları üzerine yüzde katkı oranları sırası ile % 1,56, % 54,26 ve % 38,04 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre lazer kesme işleminde frekansın yüzey pürüzlülüğü üzerine % 55,78 ve basıncın kerf genişliği üzerine % 54,26 ile en etkin parametreler olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 7.** Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için varyans analiz sonuçları.

Yüzey Pürüzlülüğü							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
<b>Frekans (Hz)</b>	<b>3</b>	<b>20,334</b>	<b>55,78%</b>	<b>20,334</b>	<b>6,7780</b>	<b>57,17</b>	<b>0,000000000444</b>
Basınç (Bar)	3	11,546	31,68%	11,546	3,8488	32,46	0,0000000129942
Kesme Hızı (mm/s)	1	1,725	4,73%	1,725	1,7252	14,55	0,0008406392853
Hata	24	2,845	7,81%	2,845	0,1186		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>36,451</b>	<b>100,00%</b>				
R-sq 92,19%							
Kerf Genişliği							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Frekans (Hz)	1	0,002812	1,56%	0,002812	0,002812	6,10	0,0210006572239
<b>Basınç (Bar)</b>	<b>3</b>	<b>0,097775</b>	<b>54,26%</b>	<b>0,097775</b>	<b>0,032592</b>	<b>70,71</b>	<b>0,000000000046</b>
Kesme Hızı (mm/s)	3	0,068550	38,04%	0,068550	0,022850	49,57	0,0000000001949
Hata	24	0,011062	6,14%	0,011062	0,000461		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>0,180200</b>	<b>100,00%</b>				
R-sq 93,86%							

### 4.4. Regresyon Analizi

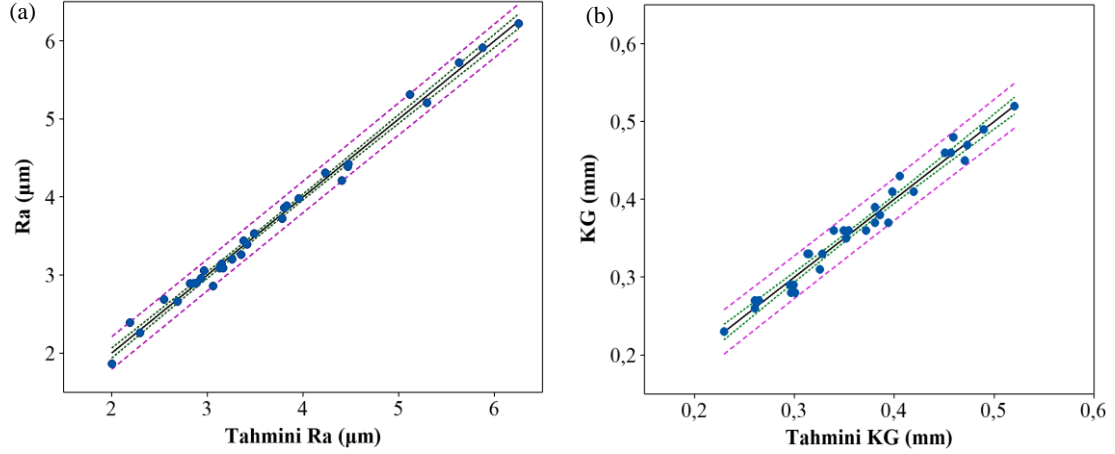
Regresyon analiz, bağımlı değişken ile bağımsız bir veya daha fazla değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak hesaplanması için kullanılan istatistiksel bir analiz yöntemidir [27]. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğinin belirlenmesi için lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Şekil 5’de, deneysel ve doğrusal regresyon sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Lazer kesme işleminde bağımsız değişkenler olarak frekans (F), basınç (P) ve kesme hızı (V), bağımlı değişkenler ise yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için tahmini lineer regresyon denklemi sırası ile denklem (2) ve (3)’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için doğrusal denklemden elde edilen R<sup>2</sup> % 88,28 ve kerf genişliği için R<sup>2</sup> % 91,81 olarak hesaplanmıştır.

$$Ra (\mu m) = 2,142 - 0,000464 F + 0,5349 P - 0,1149 V \quad (2)$$

$$KG (mm) = -0,0284 + 0,000019 F + 0,04925 P - 0,006750 V \quad (3)$$

Doğrulama testleri Taguchi ve lineer regresyon analizleri ile optimum ve rasgele seçilen lazer kesme parametreleri ile yapılmıştır. Doğrulama test sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi metodu ile yapılan doğrulama testlerinde optimum (A2B1C4) ve rasgele seçilen (A1B1C2) parametreleri için hata oranı sırası ile %7,52 ve %6,99 olmuştur. Aynı değerlerde yapılan lineer regresyon testinde optimum değerler için hata oranı %15,05 ve rasgele seçilen parametreleri için hata oranı %19,58 olarak hesaplanmıştır. Kerf genişliği için Taguchi metodu ile yapılan doğrulama testlerinde optimum (A1B1C4) ve rasgele (A1B1C2) seçilen parametreler için hata oranları sırası ile %0,43 ve %3,57 olmuştur. Aynı değerlerde yapılan lineer regresyon

testinde optimum ve rasgele seçilen parametreler için hata oranları sırası ile %4,34 ve %3,57 olarak hesaplanmıştır. Yapılan test sonuçlarında hata oranları % 20'nin altında olması sonuçların kabul edilebilir değerler arasında olduğunu göstermektedir. Benzer çalışmalarda [28], istatistiksel hatanın %20'den az olması gerektiği vurgulanmıştır.



Şekil 5. Lazer kesme deneyleri sonucu lineer regresyon sonuçlarının, (a) Yüzey pürüzlülüğü, (b) Kerf genişliği karşılaştırılması.

Tablo 8. Doğrulama test sonuçları.

Seviye	Taguchi Metot			Lineer Regresyon Denklemi		
	Deney	Tahmini	% Hata	Deney	Tahmini	% Hata
<b>Ra</b>						
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub>	1,86	2,00	7,52	1,86	1,58	15,05
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	2,86	3,06	6,99	2,86	3,42	19,58
<b>KG</b>						
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub>	0,23	0,229	0,43	0,23	0,22	4,34
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0,28	0,29	3,57	0,28	0,29	3,57

## 5. Sonuçlar

St-37 levha numunelerinin lazer ile kesilmesinde en uygun parametreler yüzey pürüzlülüğüne (Ra) ve kerf genişliğine (kW) göre Taguchi yöntemi ile belirlendi. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- ✓ Lazer kesme deneylerinde optimum çalışma parametresi olarak yüzey pürüzlülüğü için 3500 Hz frekans, 0,8 bar basınç ve 28 mm/s kesme hızı (A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) ve kerf genişliği için 2500 Hz frekans, 0,8 bar basınç ve 28 mm/s kesme hızı (A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) olarak tespit edilmiştir.
- ✓ En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 2500 Hz ve 3500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) sırası ile 2,69 µm ve 1,86 µm olarak ölçülmüştür.
- ✓ En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 2500 Hz ve 3500 Hz, 1,1 bar ve 10 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>) sırası ile 6,22 µm ve 5,91 µm olmuştur.
- ✓ En düşük kerf genişliği ise 2500 Hz ve 3500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) sırası ile 0,23 mm ve 0,26 mm olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ En yüksek kerf genişliği değeri 2500 ve 3500 Hz, 1,1 bar ve 10 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>) sırası ile 0,49 ve 0,52 mm olmuştur.
- ✓ Sinyal/gürültü (S/N) yanıt tabloları incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerleri için en etkili lazer işleme parametresinin 3500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s (A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) ve kerf genişliği için 2500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s olarak belirlenmiştir.
- ✓ Varyans analizi sonucu yüzey pürüzlülüğü için % 55,78 ile frekans ve kerf genişliği için % 54,26 basınç etkili parametre olmuştur.

- ✓ Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için hesaplanan tahmini değerler sırası ile 2,0009  $\mu\text{m}$  ve 0,2606 mm olmuştur.
- ✓ Lineer regresyon denklemleri ile yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için elde edilen R2 sırası ile % 88,28 ve % 91,81 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Yapılan çalışmada kullanılan St-37 sac malzemesinin lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü üzerine frekansın ve kerf genişliği üzerine basıncın etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda lazer kesme parametrelerinin daha geniş aralıklarda tutularak yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerine etkileri tekrar incelenebilir. Ayrıca odak noktası, nozul çapı ve nozulun yüksekliği gibi lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğini doğrudan etkileyen diğer parametrelerde incelenmelidir.

### Kaynaklar

- [1] Chen MF, Ho YS, Hsiao WT, Wu TH, Tseng SH, Huang KC. Optimized laser cutting on light guide plates using grey relational analysis. *Opt. Lasers Eng* 2011; 49(2), 222-228.
- [2] Yang CB, Deng CS, Chiang HL. Combining the Taguchi method with artificial neural network to construct a prediction model of a CO2 laser cutting experiment. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2012; 59, 1103-1111.
- [3] Madić M, Radovanović M. Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO2 laser cutting of mild steel. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2013; 35, 103-110.
- [4] Arif AFM, Yilbas BS. Thermal stress developed during laser cutting process: consideration of different materials. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2008; 37, 698-704.
- [5] Nyong K, Nyeoh CY, Mokhtar M, Rahman RA. Finite element analysis of laser inert gas cutting on Inconel 718. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2012; 60, 995-1007.
- [6] Wandera C. Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam. M.S. Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2006; 127-128.
- [7] Sharma A, Yadava V. Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile. *Opt. Laser Technol.* 2012; 44 (1), 159-168.
- [8] Thawari G, Sarin Sundar JK, Sundararajan G, Joshi SV. Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys. *J. Mater. Process. Technol.* 2005; 170, 229-239.
- [9] Çaydaş U, Haşçalık A. Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics. *Opt. Laser Technol.*, 2008; 40, 987-994.
- [10] Pandey AK, Dubey A. Modeling and optimization of kerf taper and surface roughness in laser cutting of titanium alloy sheet. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2013; 27 (7), 2115-2124.
- [11] Gautam GD, Mishra DR. Firefly algorithm based optimization of kerf quality characteristics in pulsed Nd:YAG laser cutting of basalt fiber reinforced composite. *Composites Part B: Engineering*, 2019; 179 (1), 1-15.
- [12] Karthikeyan R, Senthilkumar V, Thilak M, Nagadeepan A. Application of grey relational analysis for optimization of kerf quality during CO2 laser cutting of Mild Steel. *Materials Today: Proceedings*, 2018; 5(9), 19209-19215.
- [13] Akgün M, Yurtkuran H, Ulaş HB. AA7075 alaşımının işlenebilirliğine suni yaşlandırmanın etkisinin analizi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2020; 26(1), 75-81.
- [14] Özlü B, Akgün M, Demir H. AA6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2019; 5(2), 151-158.
- [15] Yaka H. Tornalama Sonrası Çıkan Talaşlardan Elde Edilen Alüminyum 5000 Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Yöntemi ile Analizi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2021; 11(1), 464-473.
- [16] Nas E, Akıncıoğlu S. Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2019; 7(1), 115-126.
- [17] Özyay Ç, Ballıkaya H, Altuğ M, Savaş V, Sağlam M, Teğetsel Silindirik Taşlama Yönteminde İşleme Parametrelerinin Titreşim Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 2018; 30(1), 311-317.
- [18] Gür AK, Yıldız T, İcen B. Theoretical evaluation of abrasive wear behavior of B4C/FeCrC coating layer evaluated by a Taguchi approach. *Materials Testing*, 2020; 62(7), 733-738.
- [19] Altuğ M, Erdem M, Özyay Ç. Experimental investigation of kerf of Ti6Al4V exposed to different heat treatment processes in WEDM and optimization of parameters using genetic algorithm. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015; 78, 1573-1583.
- [20] Akkuş H, Yaka H. 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*, 2021; 1, 1-9.
- [21] Pandey AK, Dubey AK. Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet. *Optics & Laser Technology*, 2012; 44(6), 1858-1865.
- [22] Ghany KA, Newishy M. Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005; 168, 438-447.
- [23] Rajaram N, Sheikh-Ahmad J, Cheraghi SH. CO2 laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003; 43, 351-358.
- [24] Ayı M, Yücelişli 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.

- [25] Yilbas BS. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004; 155, 2106-2115.
- [26] Akkuş H, Yaka H. Optimization of Turning Process By Using Taguchi Method. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2018; 22(5), 1444-1448.
- [27] Kıvak T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 2014; 50, 19-28.
- [28] Nas E, Öztürk B. Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials. *Mater. Test.*, 2018; 60, 519-525.



## Linyit Kömürün Kurutulması için Karbonik Film Teknolojili Yeni Bir Kurutucu Tasarımı

Hasan HACİFAZLIOĞLU<sup>1\*</sup>, Buse BOLAT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

\*<sup>1</sup> hasanh@istanbul.edu.tr, <sup>2</sup> busebolat.9701@gmail.com

(Geliş/Received: 16/07/2020;

Kabul/Accepted: 08/11/2020)

**Öz:** Endüstriyel ölçekte kömür kurutma işlemleri için genellikle döner kurutucular tercih edilmektedir. Ancak, döner kurutucuların ilk yatırım ve bakım-onarım maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca, döner kurutucularda kömürün tutuşma riski de bulunmaktadır. Bu bağlamda, çevre ile dost, ilk yatırım maliyeti düşük ve kömürün tutuşma riski bulunmayan bir kurutma sistemi düşünüldüğünde, karbonik film teknolojisi ön plana çıkmaktadır. Karbonik film teknolojisi ile kendiliğinden tutuşma riski olan kömürlerin “düşük sıcaklık kurutması” yapılabilir. Ancak, bu teknolojiyle kurutma yapan herhangi bir kurutucu sistemi henüz mevcut değildir. Bu çalışmanın amacı yeni teknoloji olan “karbonik film ısıtıcı” ile yeni bir kurutucu tasarımıdır. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki, karbonik film teknolojisi ile linyit kömürlerin nemi düşük enerji tüketim değerleriyle giderilebilmektedir. Ancak, bu teknolojinin kurutma süresinin uzun olduğu söylenebilir. Öyle ki, 1 saatlik kurutma işlemi sonunda linyitteki nem %9 civarında azaltılabilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Linyit kömür, Kurutma, Karbonik film, Kurutucu tasarımı

### Design of A New Dryer With Carbonic Film Technology For Drying Lignite Coal

**Abstract:** Rotary dryers are generally preferred for industrial coal drying processes. However, the initial investment and maintenance-repair costs of rotary dryers are quite high. In addition, there is a risk of coal igniting in rotary dryers. In this context, considering a drying system that is environmentally friendly, has a low initial investment cost and has no risk of ignition of coal, carbonic film technology comes to the fore. With the carbonic film technology, “low-temperature drying” of the coals at risk of self-ignition can be done. However, there is no dryer system drying with this technology yet. The aim of this study is to design a new dryer with the new technology “carbonic film heater”. Experimental studies have shown that, with the carbonic film technology, the moisture of lignite coals can be removed with low energy consumption values. However, it can be said that the drying time of this technology is long. So much so that after 1 hour of drying, the moisture in the lignite could be reduced by around 9%.



**Key words:** Lignite coal, Drying, Carbonic film; Dryer design

#### 1. Giriş

Ülkemiz linyitlerindeki en önemli safsızlıklardan biri de nemdir. Nem, bazı linyitlerde %60'lara kadar çıkabilmekte ve kömürün ısı değerini düşürmektedir. Kömürlerde giderilen %1'lik nem kömürün ısı değerinde kömür tipine bağlı olarak ortalama 40-60 kcal/kg'lık bir artış sağlamaktadır. Ayrıca nem; nakliye, stoklama ve fırınlarda gereksiz yük oluşturmada ve işlem maliyetlerini arttırmaktadır.

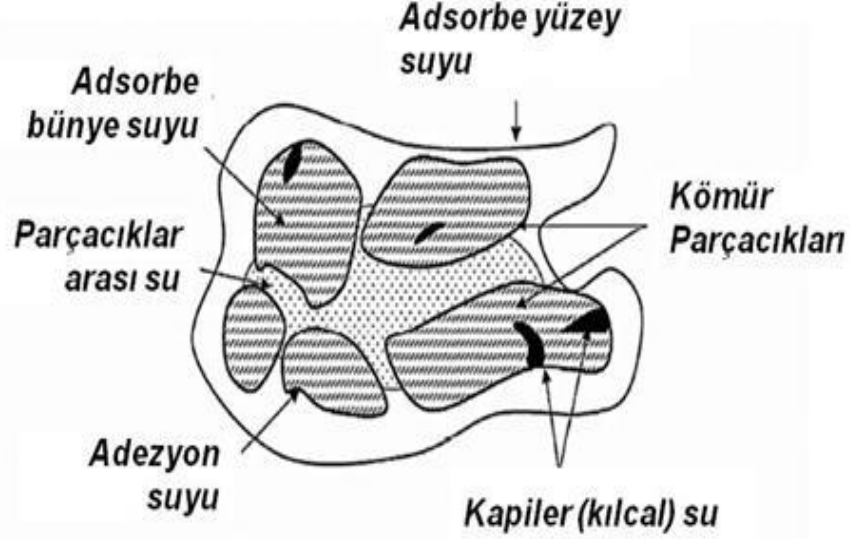
Kömürler, gözenekli yapıları ve içeriğindeki yüksek adsorpsiyon yetenekli kil mineralleri nedeni ile önemli miktarlarda nemi bünyelerinde hapsedebilmektedir. Diğer taraftan, kömürlerin boyutu küçüldükçe birim yüzey alanı artışı nedeni ile nem tutma kapasiteleri de o derece artmaktadır. İnce boyutlu kömürlerde bulunabilecek nem tipleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu nemlerin büyük bir bölümü (adsorbe yüzey suyu, parçacıklar arası su, kapiler su, adezyon suyu) filtre ve santrifüj gibi çeşitli “susuzlandırma makineleri” ile giderilebilirken, özellikle kömüre kimyasal bağlarla bağlı olan adsorbe bünye suyu sadece termal bir işlem olan “kurutma” yöntemi ile giderilebilir. Kurutma yöntemi ile mevcut tüm nemlerin giderilmesi mümkündür [1].

Kömürler üzerinde yapılan çoğu araştırma göstermiştir ki, özellikle düşük kaliteli kömürler (linyitler) 40-50 °C gibi sıcaklıklarda kendiliğinden yanmaya başlamaktadır [2]. Kömürde 40 °C'den sonraki sıcaklıklarda yavaş yavaş oksidasyon başlamakta ve özellikle 70 °C'lik sıcaklıklardan sonra oksidasyon hızı artmaktadır. Bu oksidasyon ile ısı artmakta ve kömürün tutuşma sıcaklığına (düşük kaliteli kömürler için 150-250 °C) ulaşması durumunda ise kömür yanmaya başlamaktadır [2-4]. Dolayısıyla, yüksek ısı üreten kurutucular kömürün

\* Sorumlu yazar: [hasanh@istanbul.edu.tr](mailto:hasanh@istanbul.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>  0000-0003-1651-7779, <sup>2</sup>  0000-0002-5114-2565



tutuşmasına ve yanmasına neden olabilir. Düşük tutuşma sıcaklığı olan linyit kömürlerin kurutulması için düşük ısı üreten kurutucular kullanılması tavsiye edilmektedir.



Şekil 1. İnce taneli kömürlerde bulunabilecek nem tipleri

Kurutma, bir malzeme içerisinde bulunan sıvının ısı yolla uzaklaştırılması işlemidir. Bu işlem çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebileceği gibi genellikle Termodinamiğin I. Kanunu, enerjinin korunumu ilkesine göre, ısı ve kütle transferi yoluyla gerçekleştirilir. Malzemenin herhangi bir yöntemle ısıtılması sonucunda içeriğindeki sıvı buharlaşmakta ve kuruma işlemi gerçekleşmektedir. Kurutma işleminin temeli, gerekli olan ısı enerjisi oluşturmaya dayanır. Isı temelde 5 farklı şekilde ortaya çıkarılabilir. Bunlar; kimyasal reaksiyon (örneğin kömür ve doğalgazın yanması gibi), nükleer reaksiyon (örneğin güneşteki reaksiyonlar gibi), öz direnci yüksek telden akım geçirilmesi ile (örneğin rezistanslı ısıtıcılardaki gibi), mekanik olarak (malzemeye sürtünme veya basınç uygulayarak) ve elektromanyetik ışınım ile yani radyasyon yolu ile de (mikrodalga fırınlarda olduğu gibi) ısı oluşturulabilir.

Bir kurutma işlemindeki ısı transferi, kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon yoluyla yapılabilir. Klasik kömür kurutucularında kondüksiyon ve konveksiyonla ısı transferi gerçekleşirken, son yıllarda özellikle düşük enerji tüketimleri nedeniyle mikrodalga, kızılötesi ışın, ultraviyole, radyo dalgası gibi radyasyon yoluyla ısıtma çalışmalarına ağırlık verilmiştir. Isının radyasyon yolu ile transferinde maddesel bir ortama ihtiyaç duyulmaz.

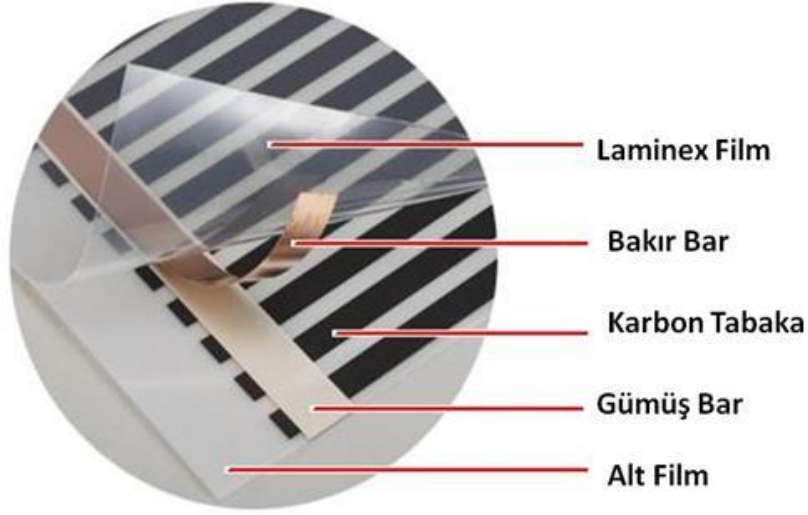
Bir çeşit radyasyon olan kızılötesi ışınım, etraflarındaki havayı ısıtmadan sadece ışık geçirmeyen cisimleri ısıtmaktadır. Kızılötesi ısıtma; boya kurutma, plastik üretimi, tavlama ve meyve kurutma gibi alanlarda kullanılmaktadır. Malzemenin karakteristiğine uygun kızılötesi frekans seçimi enerji verimliliğini de etkilemektedir. Temelde üç tip kızıl ötesi ışın olup; bunlar, kısa, uzun ve orta dalga kızılötesi ışınlardır. Aralarındaki temel fark radyasyonun işleyebilme derinliğidir. Uzun dalgalar malzemenin sadece yüzeyini ısıtırken, kısa dalgalar malzemenin içine kadar işler. Orta dalga kızılötesi ışınlar ise uzun ve kısa dalgaların işleyebildiği derinliğin yarısı kadar bir derinliğe işleyebilir [5-13]. Karbonik film, uzun kızılötesi ışın yayan yeni nesil bir ısıtıcı tipidir. Film içerisinde bulunan karbon nano partiküller yardımıyla radyasyon ısısı oluşturulur ve yüzey ısıtılır.

Bu çalışmada, uzun kızılötesi ışın yayan karbonik film teknolojisi ile linyit kömürü düşük sıcaklık kurutulmasına tabi tutulmuş ve bu karbonik filmle yeni teknoloji bir kurutucu tasarımı yapılmıştır.

## 2. Karbonik Film Teknolojisi

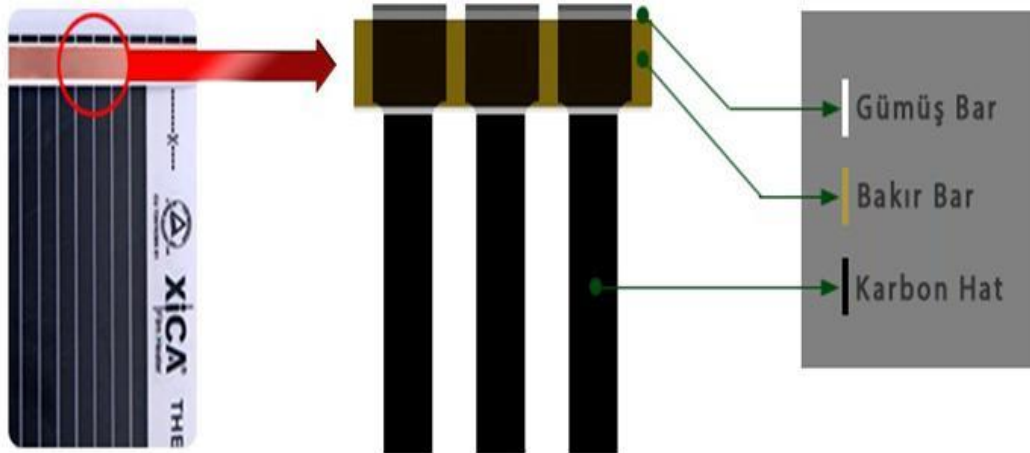
Karbonik filmdeki ısı üretim mekanizması, elektromanyetik ışınım, yani radyasyon yolu ile sağlanır. Karbonik ısıtıcı film, iletken olmayan ve yanmayan filme ısıtıcı karbon tabaka ve kirlilik önleyici tabakanın işlenmesi, bakır şerit ile elektrotun hazırlanması sonrası PET film ile lamine işleminin yapılması ile oluşturulan son teknoloji yassı bir uzak kızılötesi (FIR) ısıtıcıdır. Filmin içinde ısıtma teli, ısıtma kablosu veya rezistans

bulunmaz. Şekil 2’den görüleceği üzere, temel hammaddesi karbon, gümüş ve bakırdır. Isı kaynağı ortada duran çok ince siyah nano karbon bir tabakadır. Karbon tabakaya verilen elektrik enerjisi ile uzak kızılötesi ışınlar yayılmakta ve film ısınmaktadır. Karbon ısıtıcı filmin ürettiği uzak kızılötesi ışınım, 5.6-1000 mikron arasındaki dalga boylarını içeren ışınlardır. Bu ışınlar güneş ışınları, insan vücudu, metaller ve bazı mineraller tarafından da saçılabilir [12].



Şekil 2. Karbonik ısıtıcı filmin ısıtma mekanizması ve iç yapısı

Isıtıcı filmin kalitesini kullandığı karbon, gümüş ve bakır tabakaların yapıştırılma ve rezistans kalitesi ile nano partiküllerin akışkanlığı belirler. Şekil 3’de görüldüğü üzere, film çok sayıda katmandan oluşur. Filmin toplam kalınlığı 0.5 mm’dir. Filmlerin boyu 100 m’ye kadar, enleri ise 1 m’ye kadar üretilebilmektedir. Şimdiki teknoloji ile karbon filmlerin yüzey sıcaklıkları 60 °C kadar çıkabilmektedir. Özel üretim filmlerle daha yüksek sıcaklıklara ulaşılabilen firma tarafından belirtilmiştir. Ayrıca film ısıtıcının dış tabakası olan PET, özel bir ürün olup hava ile temas etmeyecek şekilde izolasyonu sağlamakta ve ısıtıcı filmi yatay ya da dikey zeminlerde kullanmaya olanak sağlamaktadır. Bu PET tabakası değiştirilerek daha sağlam, aşınmaya dayanıklı yüzeyler elde edilebilir [13]. Karbonik filmlerin başlıca avantajları, ilk yatırım maliyetinin ve işletme maliyetinin düşük olmasıdır. Ayrıca, hızlı ısınma yeteneğine sahip olması, işlem kolaylığı sağlamaktadır.



Şekil 3. Karbonik film ısıtıcıdaki gümüş, bakır bar ve nano karbon hattının görüntüsü

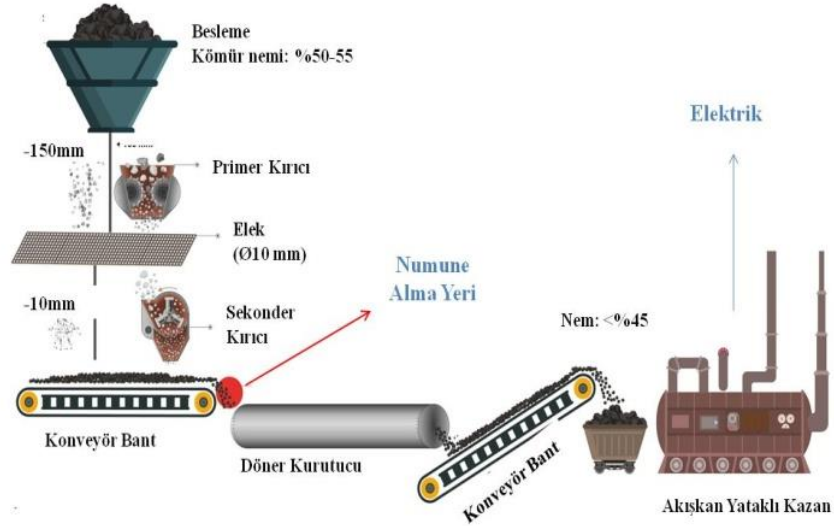
### 3. Deneysel Çalışmalar

#### 3.1 Linyit Kömür Numunesinin Özellikleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan linyit kömür numunesi Akdeniz bölgesinde faaliyet gösteren bir kömür ocağından alınmıştır. Açık işletme yöntemi ile işletilen bu ocakta kömürün havanın durumuna bağlı olarak %45 ile %55 oranında nem içerebilmektedir. Bu kömürler primer ve sekonder kırıcıdan geçirilerek 10 mm'nin altına kırıldıktan sonra termik santralde akışkan yataklı bir kazanda yakılmakta ve elektrik enerjisi üretimi için kullanılmaktadır.

Özellikle %50 nemin üzerindeki kömürlerin yakılmasında akışkan yatakta çeşitli problemler (korozyon, cüruf oluşumu vb) meydana gelmekte ve bunun sonucunda hem kazan hem de ısı verim düşmektedir. Bu durum elektrik üretim kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu bağlamda, özellikle sonbahar ve kış aylarında nemin yüksek olması nedeni ile kabarcıklı akışkan yataklı kazanın önüne ekonomik bir kurutucu konulması planlanmaktadır. Endüstriyel ölçekte genellikle kurutma işlemi döner kurutucularla yapılmaktadır. Ancak, döner kurutucuların ilk yatırım, bakım-onarım ve işletim maliyetleri oldukça yüksektir. Ayrıca, bu kurutucuda kömür yakıldığı için sera gazı emisyonları oluşmakta ve çevreyi kirletmektedir.

Söz konusu santralde döner kurutucu kullanılması durumunda yakıt hazırlama prosesinin akım şeması Şekil 4'de gösterildiği gibi olacaktır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan kömür numunesi döner kurutucunun girişinden alınmıştır. Bu kömür numunesinin kısa kimyasal ve ısı analizleri Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'e göre kömür orijinal bazda %51.81 nem içermekte ve brüt ısı değeri 1537 kcal/kg gelmektedir. Bu kömürün tamamen kurutulması durumunda ise brüt ısı değeri 3189 kcal/kg'a kadar yükselmektedir.



Şekil 4. Döner kurutuculu termik santral yakıtı hazırlama prosesi

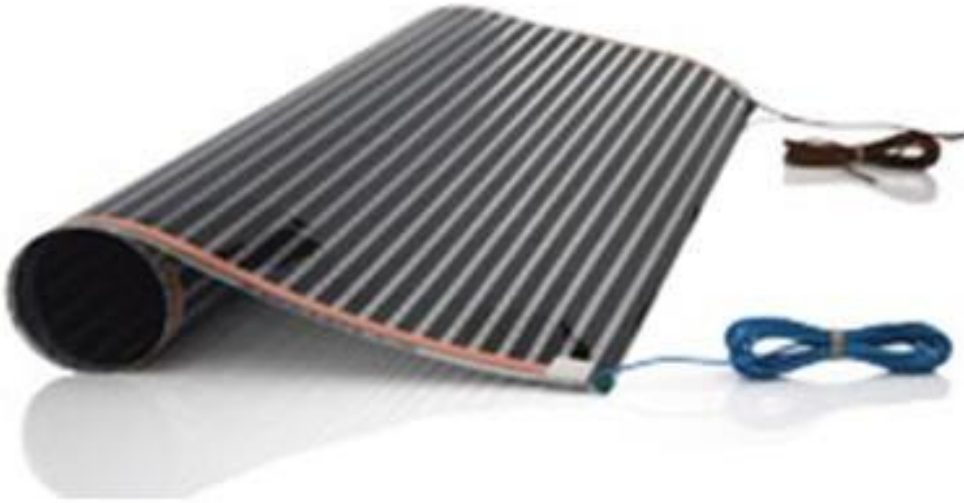
Tablo 1. Numunenin kimyasal ve ısı analiz sonuçları

İçerik	Orijinal Kömürde	Kuru Kömürde
Toplam Nem (%)	51.81	0.00
Kül (%)	21.96	45.58
Uçucu Madde (%)	19.53	40.52
Toplam Kükürt (%)	1.96	4.06
Sabit Karbon (%)	18.36	38.09
Brüt Isıl Değer (kcal/kg)	1537	3189

Termik santraldeki akışkan yataklı kazanın tasarım parametreleri brüt 1600-2000 kcal/kg'lık kömürün yakılması için planlanmış olup, kömürün neminin %100 giderilmesinin ve kalorisinin 3189 kcal/kg'a yükseltilmesinin hiçbir anlamı yoktur. Bu kömürden %1'lik nem giderimi ile ısı değerinde yaklaşık 32 kcal/kg bir artış sağlanmaktadır. %10 nem giderilmesi durumunda ise orijinal bazda kömürün brüt ısı değeri hesaplanırsa; teorik olarak  $1537 + (32 \times 10) = 1857$  kcal/kg bulunur. Bulunan bu ısı değerli (1857 kcal/kg) kömürün yakılması ile akışkan yataklı kazanın ihtiyacı olan optimum kömür elde edilmiş olur. Kurutma maliyetleri de düşünüldüğünde kömürden %5 ile %10 aralığında bir nem giderimi termik santral verimliliğinin optimize edilmesi açısından yeterli olacaktır.

### 3.2. Karbonik Filmler Deney Düzeneği ve Yöntem

Yukarıdaki bilgiler ışığında kömür numunesinden %5-10 aralığında bir nem giderimi yeterli gözükmemektedir. Bu nem gideriminin sağlanması için, ilk yatırım maliyeti düşük, kömürün kendiliğinden yanmasına sebebiyet vermeyecek, çevre dostu yeni teknoloji bir kurutucu tasarımı planlanmıştır. Bu tasarım için özellikle son yıllarda evlerin ısıtılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaya başlanan karbonik film ısıtma teknolojilerinden faydalanılacaktır. Şekil 5'de gösterilen RexVa firmasının XICA karbonik ısıtma filmleri kullanılarak Şekil 6'daki deneysel ölçekli kurutucu tasarlanmıştır.



Şekil 5. Kurutucu tasarımında kullanılan ısıtıcı film ve elektrik bağlantısı

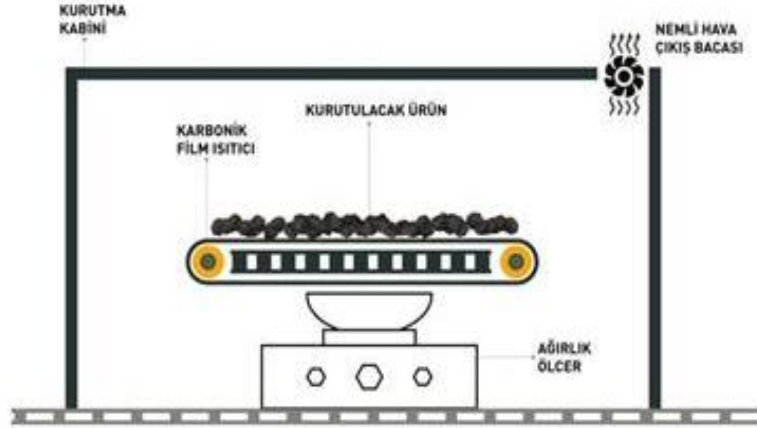
Şekil 3.3'de gösterilen deneysel ölçekli kurutucuda kullanılan karbonik film 0.25x0.50 m ölçülerinde ve toplamda 0.1 m<sup>2</sup>'lik etkin bir kurutma alanına sahiptir. Karbonik filmin çektiği güç 30 Watt yani 0.003 kWh'dır. Buna göre karbonik filmin çektiği akım (I) ve oluşturduğu direnç (R) aşağıdaki formüllerle hesaplanırsa:

$$W = V \times I \quad (1)$$

Denklem 1'den;  $30 = 220 \times I$ ,  $I = 0.136$  Amper bulunur.

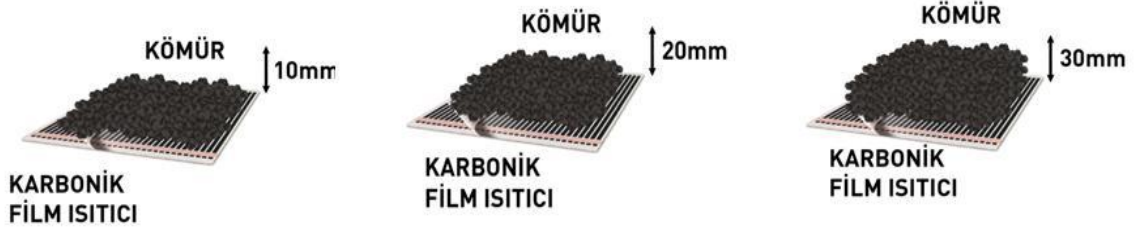
$$V = I \times R \quad (2)$$

Denklem 2'den karbonik filmin oluşturduğu direnç hesaplanırsa;  $220 = 0.136 \times R$ ,  $R = 1617.647$  Ohm'luk bir direnç bulunur. Burada, W=Güç (Watt), V=Gerilim (Volt), I=Akım (Amper) ve R=Direnç (Ohm)'dur.

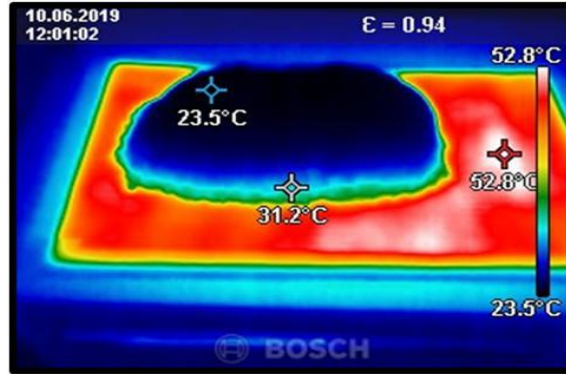


Şekil 6. Karbonik filmlili kurutma deney düzeneği

Karbonik film üzerine belli bir yükseklikte boyutu -10 mm olan kömür konulmakta ve filmin altında bulunan hassas teraziden zamana bağlı olarak kömürün ağırlık kaybı tespit edilmektedir. Kurutma deney düzeneğinde yapılan ön incelemelerde, karbonik filmin çektiği güç ya da kurutma ısısının kontrol edilemeyeceği saptanmıştır. Karbonik filmin çektiği güç sabit olup, 30 Watt'tır. Kömürün kurutulduğu yüzeyin sıcaklığı ise 50-55 °C aralığında değişkenlik göstermektedir. Mevcut deney düzeneğinde değiştirilebilecek tek parametre kurutulacak olan kömürün yüksekliğidir. Gerçekten de bu parametrenin oldukça önemli etkilere sahip olduğu deney sonuçlarından da görülmüştür. Karbonik film üzerinde kömürün yüksekliği 10 mm, 20 mm ve 30 mm olacak şekilde ayrı ayrı deneyler yapılmıştır (Şekil 7). 10 mm kömür yüksekliğinde kömürün toplam ağırlığı 600 gr iken, 20 mm yükseklikte 1200 gr, 30 mm yükseklikte ise 1800 gr tartılmıştır. Karbonik film teknolojisi ile kurutma yapılırken çekilmiş olan termal kamera görüntüsü Şekil 8'de verilmiştir.



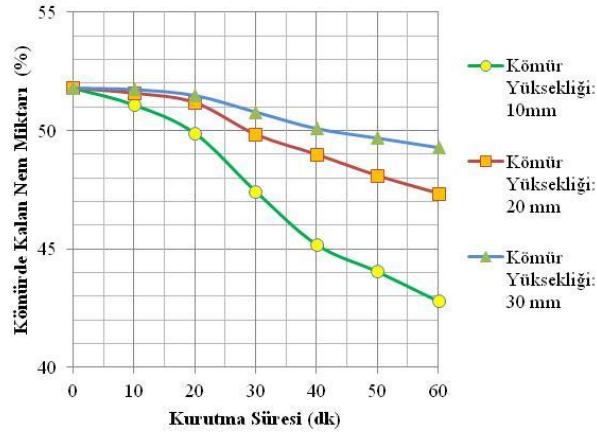
Şekil 7. Karbonik film üzerinde farklı yükseklikteki kömürlerin görüntüsü



Şekil 8. Kurutma deney düzeneğinin termal kamera görüntüsü

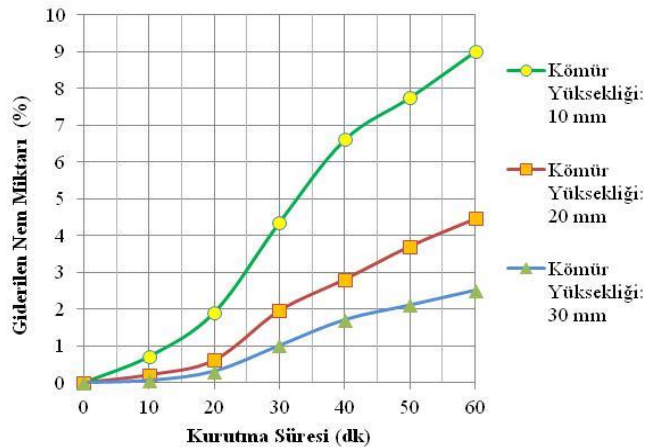
#### 4. Deneysel Sonuçları ve Değerlendirme

Kurutma süresine bağlı olarak kömürde kalan nem miktarları Şekil 9’da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre, karbonik film ısıtıcı üzerinde 10 mm yüksekliğinde kömür kurutması yapıldığı zaman 60’ncı dakikanın sonunda kömürde kalan nem miktarı %42.80 iken, 20 mm kömür yüksekliğinde kalan nem %47.35, 30 mm yükseklikte ise %49.30 bulunmuştur. Karbonik film üzerinde kurutulmuş kömürün yüksekliği arttıkça kömürün içinde kalan nem miktarı da artmaktadır. Başka bir deyişle, kömürden giderilen nem miktarı karbonik film üzerindeki kömür yüksekliği ile ters orantılıdır. Bu durum Şekil 10’dan açıkça görülmektedir. Sırasıyla, 10, 20 ve 30 mm olan kömür yüksekliklerinde kurutma yapıldığında, 60’ncı dakikanın sonunda giderilen nem miktarları sırasıyla %9.01, %4.46 ve %2.51 bulunmuştur.

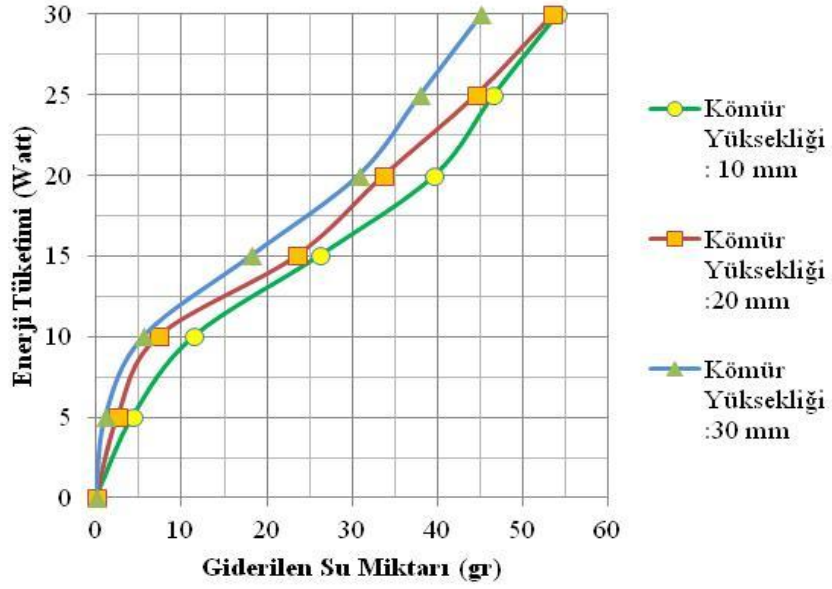


Şekil 9. Kurutma süresine bağlı olarak kömürde kalan nem miktarı

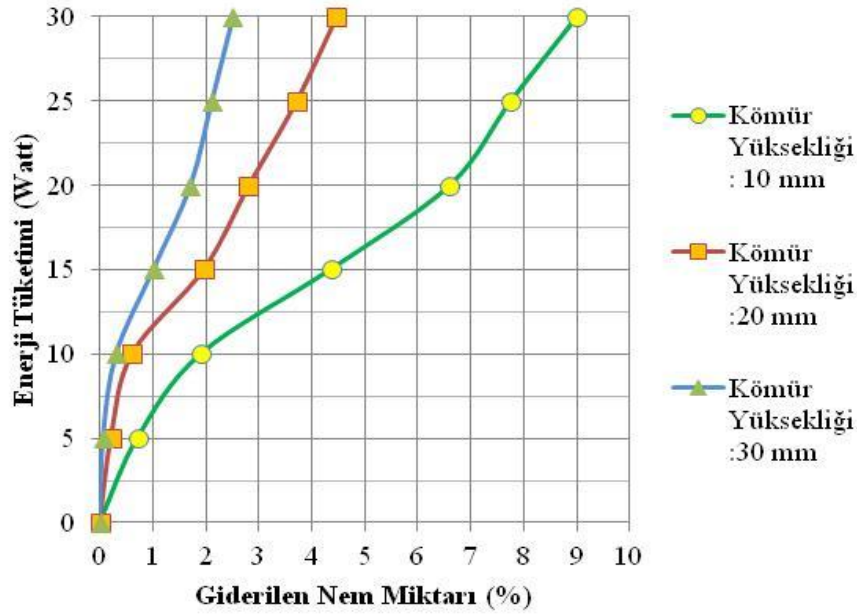
Karbonik film üzerinde kurutulmuş kömürün yüksekliği önemli bir işletim parametresidir. Öyle ki, yüksekliğin çok fazla olması durumunda kurutma verimi azalmakta ve daha fazla güç ile daha az miktarda su giderimi sağlanmaktadır. Şekil 11 incelendiği zaman, 20 Watt’lık bir enerji ile 10 mm yüksekliğindeki kömürden 39.66 gr su giderilmişken, kömür yüksekliği 30 mm’ye çıkarıldığında su giderimi 30.78 gr’a düşmüştür. Bu durumu destekleyen sonuçlar Şekil 12’de verilen nem giderimi-enerji tüketiminden de açıkça görülmektedir. 20 Watt’lık bir enerji ile; 30 mm yüksekliğindeki kömürden giderilen nem miktarı %1.71 iken, 10 mm yüksekliğindeki kömürden giderilen nem miktarı %6.61 bulunmuştur. Tabaka kalınlığıyla nem giderimi arasında ters bir orantı söz konusudur.



Şekil 10. Kurutma süresine bağlı olarak giderilen nem miktarı

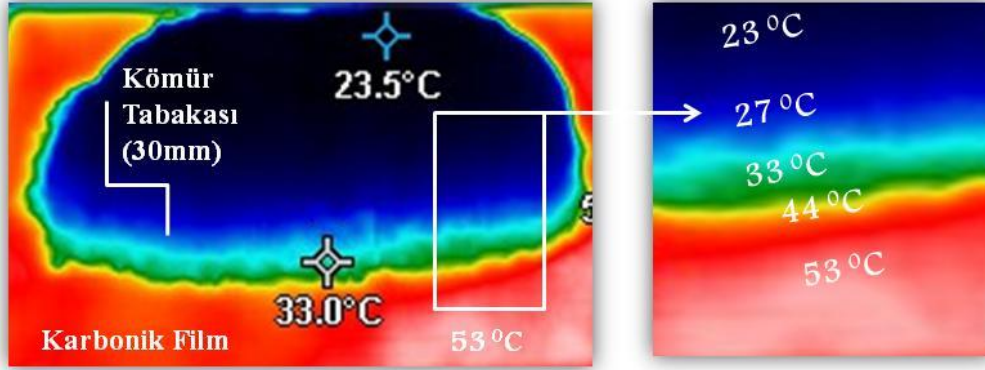


Şekil 11. Giderilen su miktarına bağlı olarak tüketilen enerji miktarları



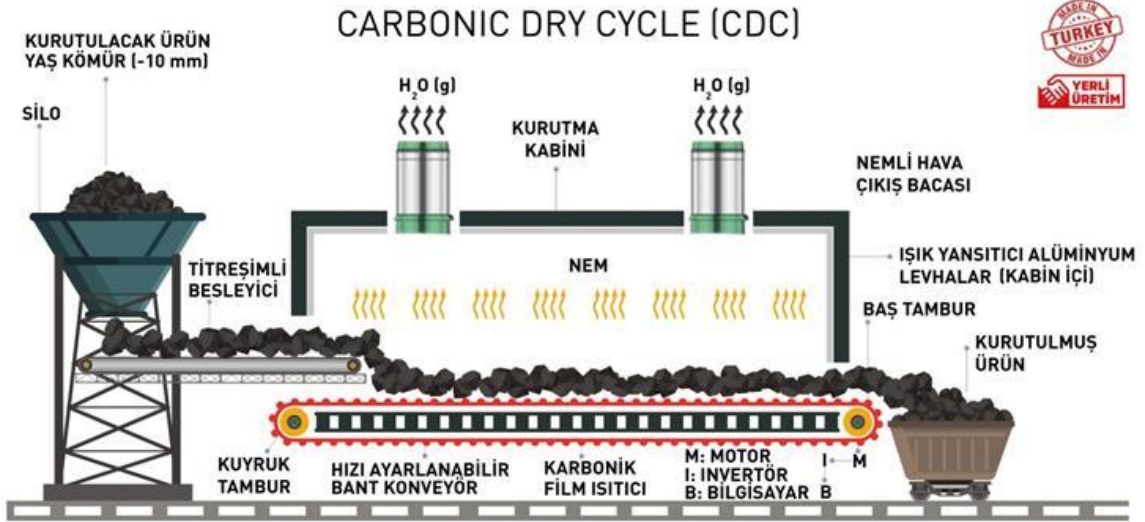
Şekil 12. Giderilen nem miktarına bağlı olarak tüketilen enerji miktarları

Şekil 13'de karbonik film teknolojisi ile kurutma işleminin termal kamera görüntüsü verilmiştir. Kurutulan kömür tabakası alt kısımdan ısınmaya başlamakta ve yukarıya doğru buhar çıkışı olmaktadır. Kömür tabaka kalınlığının artmasıyla üst kısımlar daha serin kalmakta ve üst kısımda kurutma verimi düşmektedir. Ayrıca nemli hava yukarıya doğru yükseldiği için üst kısımların nem içeriği de artmaktadır. Şekil 13'den görülebileceği gibi, 30 mm kömür yüksekliğinde en üst kısmın yüzey sıcaklığı  $23.5^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşmüştür. Oysa, karbonik film yüzeyi  $53^{\circ}\text{C}$  ve kömür-film temas yüzeyinde (buharlaşmanın en yoğun olduğu yüzeyde) ölçülen sıcaklık değeri ise  $33^{\circ}\text{C}$ 'dir.



Şekil 13. Karbonik film üzerinde kurutulmuş kömürün termal kamera görüntüsü

Yukarıdaki veriler ışığında, karbonik film teknolojisi ile tasarlanması öngörülen kurutucu tipi Şekil 14’de gösterilmiştir. CDC yani "*Carbonic Dry Cycle*" olarak adlandırılan bu kurutucuda, çentikli bir bant konveyörün üzeri karbonik ısıtıcı film ile kaplanmakta ve bu film üzerinde hareket halindeki ince (<10 mm) kömür kurutulmaktadır. Isı kaybının minimize edilmesi ve kurutma sıcaklığının daha da artırılması için çentikli bant konveyör hattı boyunca bir kabinle kapatılmıştır. Yoğuşmanın önlenmesi için kabine yeterli sayıda nem atıcı fanlı bacalar eklenmiştir. Kurutulacak malzeme, hızı ayarlanabilen çentikli bant konveyör üzerinde yavaşça titreştirilerek ve bu esnada karışarak ilerlerken kurutma sağlanmaktadır. %100 Türk tasarımı olan bu kurutucunun en önemli avantajı hem nakliye hem de kurutmayı aynı anda temiz bir enerji kaynağı ile yani elektrik enerjisi ile yapabilmesidir. Bu tasarım, özellikle kömür ocağından termik santrallere bant konveyör ile taşınan kömürün taşınma esnasında kurutulması için tasarlanmıştır.



Şekil 14. Endüstriyel ölçekte tasarlanması öngörülen karbonik film ısıtıcı kurutucu (CDC)

## 5. Tartışma ve Sonuç

Linyit kömürlerin kendiliğinden yanmaya yatkın olması nedeni ile düşük sıcaklıklarda (<100 °C) kurutulması gerekmektedir. Düşük sıcaklık kurutmasının en önemli dezavantajı uzun kurutma sürelerine ihtiyaç duyulmasıdır. Ancak, kömürün tutuşma riskinin olmaması nedeni ile tercih edilebilecek bir yöntemdir. Bu çalışmada, karbonik film ısıtma teknolojisi ile linyit kömürü düşük sıcaklıkta kurutulmuştur. Karbonik film teknolojisinin tercih edilmesinin nedeni düşük enerji tüketimi ve düşük sıcaklık (<55 °C) üretmesidir.



Özel üretim karbonik filmlerin yüzey sıcaklıklarının 120 °C'ye kadar çıkabileceği belirtilmektedir. Ancak, standart olarak üretilen ve ısıtma amaçlı kullanımı yaygın olan karbonik filmlerin yüzey sıcaklıkları 50-55 °C'lik sıcaklıkla sınırlıdır. Bu çalışmada, standart RexVa marka bir karbonik film kullanılmış ve Akdeniz Bölgesinde faaliyet gösteren bir kömür işletmesinin linyit kömürleri kurutulmuştur. Söz konusu işletmeden üretilen kömürler mevsimsel yağışa bağlı olarak %45-55 aralığında nem içeriğine sahip olabilmektedir. Üretilen kömürler bir bant konveyör hattı ile termik santrale gönderilmekte ve -10 mm tane boyutuna kırılarak akışkan yataklı bir kazanda yakılarak elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu kazanda yakılabilecek kömürün nem içeriği maksimum %45 olmalıdır. Amaç, %45 nem içeriğine sahip kömürü elde edebilmektir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kömür numunesinin nem içeriği %51.81 bulunmuştur. O halde, gerekli yakıtın eldesi için minimum %7'lik bir nem gideriminin sağlanması gerekir.

Söz konusu kömür numunesinin karbonik film ile 1 saat kurutulması durumunda, nem içeriği %9.01 azalmış ve nem değeri %42.80'e düşmüştür. 1 ton kömürden %9.01 nem giderimi için karbonik film teknolojisinin harcayacağı güç 50 kWh bulunmuştur. Ancak, bu değer teorik oranlama hesabıyla bulunduğu için gerçek uygulamada daha yüksek olabilir. Çünkü daha fazla suyun buharlaşması durumunda, kurutucu içerisinde daha büyük negatif buhar basınçları oluşturmaya ihtiyaç duyulacaktır.

Sanayi için elektrik birim fiyatının 0.41 TL/kWh olduğu kabul edilirse, 1 ton kömürün kurutulma maliyeti, karbonik film teknolojisi ile 20.5 TL bulunur. Bu rakamlar, karbonik filmin üzerinde 10 mm yüksekliğinde kömür kurutulduğu zaman geçerlidir. Kömür yüksekliği arttırıldığında, kurutma verimi düşmekte ve kurutma maliyeti de artmaktadır.

Karbonik filmle kurutma teknolojisinde, film üzerine konulan kömürün yüksekliği önemli bir işletim parametresidir ve bu çalışmanın bir sonucu olarak bu yüksekliğin 10 mm'den daha büyük olmaması önerilir.

Deneysel çalışmalar göstermiştir ki, karbonik filmin 0.1 m<sup>2</sup>'sinde 600 gr kömür etkin olarak kurutulabildiğine göre, 1 m<sup>2</sup>'lik karbonik filmde 6 kg kömür kurutulabilir. 1 ton kömürün kurutulması için gerekli olan karbonik film alanı ise 166.66 m<sup>2</sup>'dir. Karbonik filmin 1 m<sup>2</sup>'si güncel fiyatlarla 3 USD'dir. Dolayısıyla sadece bu filmin maliyeti beher tor kömürün kurutulması için 3 USD x166.66=499.98 USD'dir. Ancak bu fiyat; sadece klasik karbonik filmin (düşük sağlamlık ve düşük ısı üreten) maliyetidir. Kömür kurutma için kullanılacak olan karbonik filmin daha yüksek ısı üretmesi ve yüzeyinin de daha sağlam olması beklenir. Çünkü, endüstriyel kurutulmalarda daha yüksek aşınmalar meydana gelecek ve daha yüksek sıcaklıklara (75-100 °C) ihtiyaç duyulacaktır. Dolayısıyla özel tip film maliyetinin de en az %25 oranında artacağı tahmin edilmektedir. Henüz böyle bir uygulama olmadığı için tam maliyet analizi yapılamamıştır.

Karbonik filmin en önemli dezavantajı muntazam kurutma yapamamasıdır. Karbonik film, sıcak yüzeyi ile temas sonucunda kurutma yapmaktadır. Dolayısıyla kömürün alt kısımları, üst kısımlarına göre daha nemli kalmaktadır. Bu durum özellikle yüksek tabaka kalınlıklarında daha da belirgin hale gelmektedir. Dolayısıyla, kurutma sonucu elde edilecek ürünün alt-üst edilerek karıştırılması gerekir, ya da kurutucu bünyesine alt-üst etme mekanizması ilave edilebilir. Bu sorun hafif titreşim ve çentikli bant konveyör kullanımı ile kısmen çözülebilmektedir. Aksi durumda üst kısımların nem içeriği, alttaki kömüre göre daha yüksek olacaktır.

Karbonik film teknolojisi, mevcut ısı üretme kapasitesi ve yapısal dayanıklılığı ile henüz kömür sektörünün kurutma ihtiyacını karşılayabilecek gibi gözükmemektedir. Ancak; filmin yüzey sıcaklığı ve yüzey dayanıklılığı arttırılırsa, tasarlanacak olan yeni tip karbonik filmlerle kurutucularla oldukça ekonomik bir kurutma yapılabilir. Bu çalışmada, karbonik filmlerin bir kurutucu olarak nasıl kullanılabileceği gösterilmiş, işletimi ve kullanımı kolay olan ekonomik yeni bir kurutucu tasarımı sunulmuştur.

## Teşekkür

Bu çalışmayı, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi desteklemiştir. Proje numarası 33221.

## Kaynaklar

- [1] Karthikeyan M, Zhonghua W, Mujumdar, AS. Low-Rank Coal Drying Technologies—Current Status and New Developments, *Drying Technology* 2009; 27: 403–415.
- [2] Yuan L, Smith AC. The Effect of Ventilation on Spontaneous Heating of Coal, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2012; 25: 131-137.
- [3] Li Z, Zhang, Y, Jiang X, Zhang Y, Chang, L. Insight into the Intrinsic Reaction of Brown Coal Oxidation at Low Temperature: Differential Scanning Calorimetry Study, *Fuel Processing Technology* 2016; 147: 64–70.
- [4] Qi G, Wang D, Zheng K, Xu J, Qi X, Zhong X. Kinetics characteristics of Coal Low-temperature

- Oxidation in Oxygen-depleted Air, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2015; 35: 224-231.
- [5] Kowalski S.J, Rajewska K. Convective Drying Enhanced with Microwave and Infrared Radiation, *Drying Technology* 2009; 27 (7-8): 878-887.
- [6] Riadh M.H, Ahmad S.A.B, Marhaban M.H, Soh A.C. Infrared Heating in Food Drying: An Overview, *Drying Technology* 2015; 33 (3): 322-335.
- [7] Delele M.A., Weiglera, F, Mellmann J. Advances in the application of a rotary dryer for drying of agricultural products: A Review, *Drying Technology* 2015; 33(5): 541-558.
- [8] Hacifazlioglu H. Madencilik Endüstrisinde Kurutma İşlemi ve Alternatif Kurutucu Tiplerinin Tanıtılması, *MT Bilimsel Yeraltı Kaynakları Dergisi*, 2019; 1-20.
- [9] Hacifazlioglu H. Production of Merchantable Coal from Low Rank Lignite Coal by Using FGX and Subsequent IR Drying, *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2019; 38: 1-8.
- [10] Jangam S.V, Majumdar A.S. Coal Dehydration, *A Compilation of Relevant Publications and Technical Reports* 2010; 77.
- [11] Tahmasebi A, Yu J, Li X, Meesri C. Experimental study on microwave drying of Chinese and Indonesian low-rank coals, *Fuel Processing Technology* 2011; 92:1821-1829.
- [12] Yüce İ. Uzak Kızılötesi Işın Yayan Kumaş ve İplikler, *Trakya University Journal of Engineering Sciences* 2017; 18(2): 145-151.
- [13] Anon, <http://www.rexva.co.kr/eng/carbon-film-underfloor-heating.php?ckattempt=1>, 2020.



## Pomza-Bazlı Adsorbanların Sentetik Su Numunelerinden Lityum Adsorpsiyonu Verimliliğinin Karşılaştırılması

Deniz İzlen ÇİFÇİ<sup>1\*</sup>, Süreyya MERİÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

\*<sup>1</sup> dicifci@nku.edu.tr, <sup>2</sup> smeric@nku.edu.tr

(Geliş/Received: 25/07/2020;

Kabul/Accepted: 11/11/2020)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı kullanımı giderek artan ve değerli bir metal olan lityumun (Li) sulu çözelti içerisinde pomza adsorbanları ile geri kazanımının araştırılmasıdır. Bu amaç kapsamında manyetik demir kaplı pomza, MnO<sub>2</sub> kaplı pomza ve Mn kaplı pomza malzemeleri hazırlanarak adsorpsiyon yöntemiyle Li giderimi karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca farklı sıcaklıkların, adsorpsiyon süresinin ve çözelti pH değerlerinin Li adsorpsiyonu üzerine etkisi de belirlenmiştir. MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın SEM-EDX ve FTIR analizleri yapılarak özellikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda demir kaplı pomza ile Li giderimi sağlanmasa da mangan kaplı pomzalar ile Li adsorpsiyonu gerçekleşmiştir. En yüksek giderimin sağlandığı MnO<sub>2</sub> kaplı pomza ile yapılan çalışmalarda 1 saat adsorpsiyon süresinden sonra giderim veriminin değişmediği, sıcaklığın Li giderimine bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Fakat çözelti pH değeri lityum gideriminde önemli olup, en yüksek Li giderimi (% 40) pH 9 değerinde elde edilmiştir. Bu giderim değeri düşük olmakla birlikte özellikle deniz suyundan tatlı su eldesi veya jeotermal sulardan Li kazanımı prosesleri için uygun ön arıtma alternatifi olacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Adsorpsiyon, lityum, mangan, pomza

### Comparison of Pumice-Based Adsorbents for Lithium Adsorption in Synthetic Aqueous

**Abstract:** The aim of this study is to investigate the recovery of lithium (Li), which is a valuable rare earth element with an increasing consumption rate, by the adsorption process using different pumice-based adsorbents (magnetic iron coated pumice, MnO<sub>2</sub> coated pumice and Mn coated pumice adsorbents) in distilled water. The effect of temperature, adsorption time and solution pH values on Li adsorption was studied. According to the results of the study, Li removal could not be achieved with iron coated pumice while Li adsorption occur with manganese coated pumice. The highest removal of Li was achieved with MnO<sub>2</sub> coated pumice and it was observed that the removal efficiency did not change after 1 h adsorption time and the temperature did not affect Li removal. However, the pH of the solution was important in Li removal, and the highest Li removal was obtained at pH 9. Although the removal efficiency was relatively low (40 %) these results can be evaluated as a good alternative for primary treatment to recover Li in membrane processes from seawater or geothermal waters.

**Key words:** Adsorption, lithium, manganese, pumice

#### 1. Giriş

Lityum (Li) 31 nadir toprak metal elementlerinden biri olup, kullanımı arttıkça da daha değerli bir metal haline gelmektedir [1]. Yaygın olarak cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, tabletler gibi elektronik cihazların pillerinde kullanılan Li parfüm, plastik, ilaç endüstrisi gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır [2]. Lityum magmatik kayalar, tuzlu su gölü ve deniz suyu gibi farklı kaynaklardan elde edilebilmekte ancak deniz suyundan elde edilmesi oldukça maliyetli olmaktadır [3]. Ülkemizde farklı su ortamlarında yapılan ölçümlerde Li konsantrasyonu 325 mg.L<sup>-1</sup> (Tuz Gölü) - 20 mg.L<sup>-1</sup> (Çanakkale Tuzla jeotermal sahasında) aralığında tespit edilmiştir [4].

Lityum geri kazanımı üzerine yapılan çalışmalarda adsorpsiyon, çökeltme ekstraksiyonu, iyon değiştirici reçineler ve membran yöntemleri metotları kullanılmıştır [4-7]. Ancak Li iyon seçici membranlar ile Li gideriminde, lityumun adsorpsiyon ve desorpsiyonu kimyasal reaksiyon oranına bağlı olduğundan dolayı deniz suyundan Li gideriminde Li seçici membranların kullanılması uygun değildir [1]. Diğer yandan, adsorpsiyon yöntemi Li geri kazanımı için uygun ve ekonomik bir yöntem olarak ifade edilmiştir [5-6]. Lityum adsorpsiyonunda asit ve sodyum amberlit, aktif karbon, polimerik alüminyum hidroksit gibi adsorbanlar kullanılmıştır [7-9]. Ancak yapılan çalışmalarda MnO<sub>2</sub>, LiMnO<sub>2</sub> veya LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> yapısında bulunan ve iyon seçici özelliğe sahip Li iyon elekleri, ağırlıklı olarak kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [10-16]. Liu ve diğ. (2015) tarafından yapılan

\* Sorumlu yazar: [dicifci@nku.edu.tr](mailto:dicifci@nku.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7527-6130, <sup>2</sup> 0000-0002-2491-2755

çalışmada, 0,2 g.L<sup>-1</sup> MnO<sub>2</sub>.0,5H<sub>2</sub>O iyon seçici adsorban kullanılarak pH 10'da 48 saat adsorpsiyon süresi sonunda Li adsorpsiyon kapasitesi 10,05 mg.g<sup>-1</sup> olarak elde edilmiştir [10]. Ancak, iyon elek esaslı adsorbanların yüksek enerji gereksinimi ve düşük özgül yüzey alanına sahip olması gibi kısıtları bulunmaktadır. Bu nedenle, yüksek yüzey alanına sahip ve sentezi kolay adsorbanların geliştirilmesi gereklidir. Kamran ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada, 30 mg.L<sup>-1</sup> giriş Li konsantrasyonu ve pH 12 değerinde 60 dakika adsorpsiyon süresi sonunda MnO<sub>2</sub> (0,1-0,2 M MnO<sub>2</sub> kaplama miktarında) kaplı aktif karbon adsorbanı ile 50,1-88,5 mg.g<sup>-1</sup> aralığında Li adsorpsiyon kapasitesi elde edilmiştir [17].

Türkiye önemli pomza rezervine sahip olup, pomza hafif, yoğun gözenekli yapısı ile yüzey alanı fazla olan ve silisyum oksit içerikli volkanik bir taştır [18]. Pomza ayrıca adsorban malzemesi olarak ucuz olup, boya ve ağır metal adsorpsiyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. Bu çalışmanın amacı, farklı kaplamalar ile hazırlanan pomza adsorbanlarının sentetik su numunelerinden Li adsorpsiyonu için kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda, manyetik demir kaplı pomza, MnO<sub>2</sub> kaplı pomza ve Mn kaplı pomza malzemeleri hazırlanmıştır. Sıcaklık, pH, adsorpsiyon süresi gibi işletme parametrelerinin Li giderimine etkisi araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Kullanılan kimyasallar

DeneySEL çalışmalarda kullanılan NaOH (Katalog No: 1.06462), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Katalog No: 1.09073), MnSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O (Katalog No: 1.05941), (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (Katalog No: 1.01200), FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O (Katalog No: 1.03965) ve FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O (Katalog No: 1.03943) Merck firmasından temin edilmiştir. Çalışmalarda giriş Li konsantrasyonu ICP-OES cihazındaki ölçüm hassasiyeti gözönünde tutularak 25 mg.L<sup>-1</sup> olarak seçilmiş olup, çözelti LiNO<sub>3</sub> (Sigma Aldrich Katalog No: 227986) kullanılarak hazırlanmıştır.

### 2.2. Pomza hazırlanışı

Bu çalışmada adsorbent olarak kullanılan pomza tozu Nevşehir'den temin edilmiş olup, pomzanın partikül boyutu 0-125 mikron arasında değişmektedir.

#### 2.2.1. Manyetik demir kaplı pomzanın hazırlanışı

Manyetik demir kaplı pomza hazırlamak için, ilk olarak FeSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O ve FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O kimyasalları Fe<sup>3+</sup> ve Fe<sup>2+</sup> molar oranları 2 olacak şekilde 200 mL distile suda çözülmüştür [19]. Daha sonra bu çözeltiliye 100 g pomza ilave edilerek, pomzadaki demir oranı ağırlıkça % 5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Çözeltinin pH değeri 9.5 olacak şekilde 6 N NaOH ilave edilmiş ve 15 dakika ultrasonikasyon uygulandıktan sonra, 1 saat 70 °C'de karıştırılmıştır. 1 saat sonunda 5 mL amonyak çözeltisi (% 30 v/v) ilave edilmiştir. Çözelti 24 saat oda sıcaklığında karıştırılmıştır. 24 saat sonunda demir kaplanmış pomza birkaç defa distile su ile yıkanarak sülfat ve klorun pomzadan uzaklaştırılması ve pH değerinin nötr pH'a ulaşması ayrıca da kaplanmayan demir metalinin pomzadan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonra manyetik demir kaplı pomza tozu 105 °C'de etüvde 24 saat kurutulmuştur.

#### 2.2.2. MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın hazırlanışı

MnO<sub>2</sub> kaplama prosedürü için literatürde Zhang ve diğ. (2007; 2009) tarafından yapılan çalışmalar esas alınmış, hazırlanışı sırasında bazı değişiklikler yapılmıştır [12-13]. MnSO<sub>4</sub>.H<sub>2</sub>O (9,72 g) ve (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (13,12 g) 100 mL distile suya eklenerek 6 N NaOH ile pH 10 değerine ayarlanmıştır. Daha sonra otoklavda 120 °C'de 20 dakika (3 kez) otoklavlanmış ve takiben 120 °C'de 6 saat karıştırılmıştır. MnO<sub>2</sub> partikülü filtreden süzülerek ayrılmış ve distile su ile yıkanmıştır. Daha sonra pomza (100 gr) 250 mL distile suya konularak MnO<sub>2</sub> partikülü ile karıştırılmış ve 6 N NaOH ilave edilerek pH 10'a ayarlanmıştır. Karışım 70 °C'de 1 saat ve oda sıcaklığında 24 saat karıştırılmıştır. Daha sonra filtre ile süzülerek MnO<sub>2</sub> kaplı pomza distile su ile yıkanmıştır. MnO<sub>2</sub> kaplı pomza 105 °C'de 24 saat kurutulduktan sonra 500 °C'de 1 saat aktive edilmiştir.

### 2.2.3. Mn kaplı pomzanın hazırlanışı

İlk olarak  $MnSO_4 \cdot H_2O$  200 mL distile suda çözünmüştür. Daha sonra bu çözelti içerisine 100 g pomza ilave edilmiştir. Pomza içerisindeki mangan oranı ağırlıkça %5 olacak şekilde ayarlanmıştır. Çözeltinin pH değeri 9,5 olacak şekilde 6 N NaOH ilave edilmiştir. Çözeltiye 15 dakika ultrasonikasyon uygulandıktan sonra, 1 saat 70 °C'de karıştırılmıştır. 1 saat sonunda çözelti soğuduktan sonra 5 mL amonyak çözeltisi (% 30 v/v) ilave edilmiştir. Çözelti 24 saat oda sıcaklığında karıştırıldıktan sonra birkaç defa distile su ile yıkanarak sülfat ve persülfatın pomzadan uzaklaştırılması ve pH değerinin nötr pH'a ulaşması ayrıca da kaplanmayan mangan metalinin pomzadan uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonra mangan kaplı pomza 105 °C'de etüvde 24 saat kurutulmuştur.

### 2.3. Adsorpsiyon çalışmaları

Adsorpsiyon çalışmalarında lityumun farklı pomzalar ile gideriminde sıcaklık ve süre etkisinin belirlenmesi amacı ile 20 ve 35 °C sıcaklıklarda Mn kaplı pomza ve  $MnO_2$  kaplı pomza ile 1 saat, 4 saat ve 24 saat adsorpsiyon sürelerinde Li giderimi belirlenmiştir. Pomza ve manyetik demir kaplı pomza için ise 25 °C sıcaklıklarda 3,5 saat ve 12 saat adsorpsiyon sürelerinde Li giderimi belirlenmiştir. Her bir erlen içerisine 2,5 g pomza ve 100 mL 25  $mg \cdot L^{-1}$  Li çözeltisi eklenmiştir.  $H_2SO_4$  ve NaOH kullanılarak numunelerin pH değeri 7'ye ayarlanmış ve çalkalayıcıya konularak 125 rpm hızda 1 saat çalkalama yapılmıştır. Çalkalama sonrasında numuneler filtre ile süzülerek Mn-Pomzanın çözelti içerisinden ayrılması sağlanmıştır. ICP-OES cihazı ile numunelerin Li konsantrasyonları belirlenmiştir.

Daha sonra lityum gideriminde pH etkisinin araştırıldığı çalışmada, her bir erlen içerisine 2,5 g Mn kaplı pomza veya  $MnO_2$  kaplı pomza konularak, 100 mL 25  $mg \cdot L^{-1}$  Li çözeltisi eklenmiştir. Erlen içerisindeki numuneler 1 N  $H_2SO_4$  ve 1 N NaOH kullanılarak pH metre (WTW 315i) yardımı ile pH 3, 5, 7 ve 9 değerlerine ayarlanmıştır. Numuneler Nüve ST30 ısıtmalı çalkalayıcıya konularak, 35 °C sıcaklıkta ve 125 rpm hız ile 1 saat çalkalama yapılmıştır. Çalkalama sonrasında numuneler filtre ile süzülerek Mn ve  $MnO_2$  kaplı pomzanın çözelti içerisinden ayrılması sağlanmıştır. ICP-OES cihazı ile numunelerin Li konsantrasyonları belirlenmiştir.

Deneyel çalışmalarda manyetik demir kaplı pomza ile lityum adsorpsiyonunda bir giderim elde edilemediğinden manyetik demir kaplı pomza miktarı artırılarak farklı pH değerlerinde adsorpsiyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada her bir erlen içerisine 7,5 g manyetik demir kaplı pomza konularak, erlene 25  $mg \cdot L^{-1}$  Li konsantrasyonuna sahip 100 mL çözeltisi eklenmiştir. Erlen içerisindeki numuneler  $H_2SO_4$  ve NaOH kullanılarak pH metre (WTW 315i) yardımı ile pH 3, 4, 5, 8 ve 11,5 değerlerine ayarlanmıştır. Numuneler Nüve ST30 ısıtmalı çalkalayıcıya konularak, 25 °C sıcaklıkta ve 125 rpm hız ile 1 saat çalkalama yapılmıştır. Çalkalama sonrasında numuneler filtre ile süzülerek Mn ve  $MnO_2$  kaplı pomzanın çözelti içerisinden ayrılması sağlanmıştır. ICP-OES cihazı ile numunelerin Li konsantrasyonları belirlenmiştir.

### 2.4. Analizler

Adsorpsiyon deneylerinde en iyi giderimin sağlandığı  $MnO_2$  kaplı pomzanın karakterizasyonu yapılmıştır. Buna göre, yüzey görüntüsü ve kaplama oranlarının belirlenmesi amacıyla SEM-EDX (FEI marka QUANTA FEG 250 model) analizi yapılmıştır.  $MnO_2$  kaplı pomzanın FTIR analizi 400-4000  $cm^{-1}$  aralığında Bruker (Vertex 70 ATR) cihazında yapılmıştır. Çalışmalarda Li analizi SpectroBlue marka ICP-OES cihazı ile yapılmıştır. Ayrıca  $MnO_2$  kaplı pomza ve Mn kaplı pomzanın adsorpsiyon sırasında kaplı olan Mn'nin çözünürlüğünün belirlenmesi için de çözelti içerisindeki Mn konsantrasyonu aynı cihaz ile ölçülmüştür.

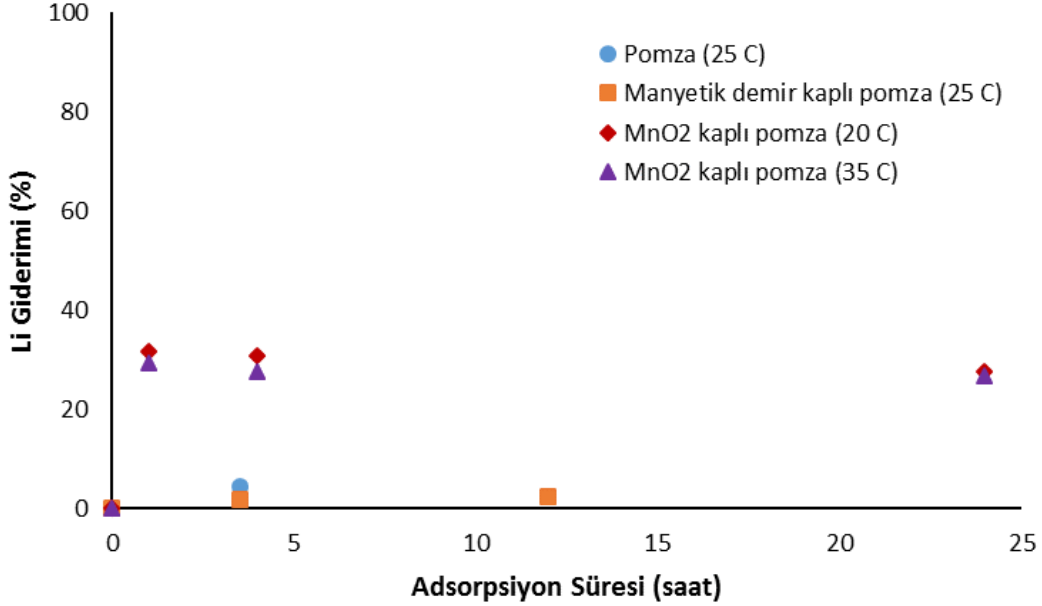
## 3. Deneysel Sonuçlar

### 3.1. Farklı pomza adsorbanları kullanılarak elde edilen Li giderimi: adsorpsiyon süresi ve sıcaklığın etkisi

Pomza, manyetik demir kaplı pomza ve  $MnO_2$  kaplı pomza kullanılarak yapılan Li giderimi çalışmalarında elde edilen Li giderimleri Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre, 25 °C'de pomza ve manyetik demir kaplı pomza ile 12 saat adsorpsiyon süresine kadar önemli bir Li giderimi elde edilememiştir.  $MnO_2$  kaplı pomza kullanılarak yapılan çalışmada ise 24 saat adsorpsiyon süresine kadar deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak 1 saat adsorpsiyon süresinden sonra Li gideriminde bir değişim gözlenmemiştir. 20 °C ve 35 °C olmak üzere 2 farklı sabit sıcaklık uygulanarak yapılan adsorpsiyon çalışmalarında da sıcaklığın Li giderimi üzerinde önemli bir

etkisinin olmadığı görülmektedir. Myai ve diğ. (1988) tarafından HMnO(Mg) adsorbani ile yapılan çalışmada da 5-35 °C sıcaklık aralığından Li gideriminde önemli bir değişim olmadığı kaydedilmiştir [20].

MnO<sub>2</sub> kaplı pomza kullanılarak 1 saat adsorpsiyon sonunda Li giderimi %29,2 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde pomza ile Li giderimi gözlenmezken, pomza kaplamaları çalışmalarında da demirin bir etkisinin olmadığı ancak mangan kaplamasının Li giderimini arttırdığı görülmektedir.



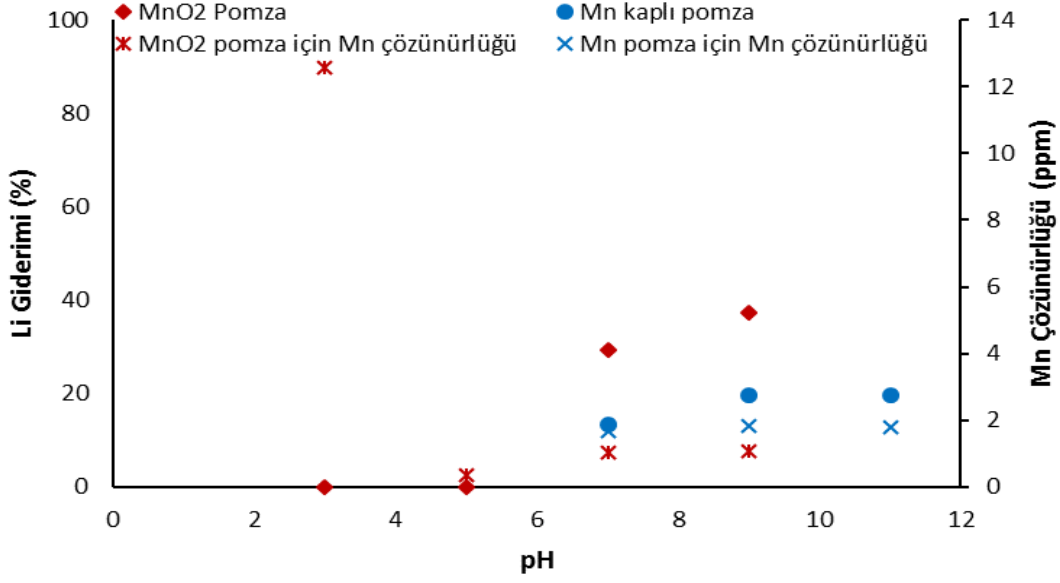
**Şekil 1.** Farklı pomza adsorbanları kullanılarak elde edilen Li giderimi (Başlangıç Li konsantrasyonu: 25 mg.L<sup>-1</sup>, çalkalama hızı: 125 rpm, pomza miktarı: 2,5 g/100 mL, pH 7)

### 3.2. Farklı Mn kaplı pomzalar ile farklı pH değerlerinde elde edilen Li giderimi

MnO<sub>2</sub> ve Mn kaplı pomza kullanılarak farklı pH değerlerinde, 1 saat adsorpsiyon süresi sonunda elde edilen Li giderimleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü üzere pH 3 ve 5 gibi asidik koşullarda Li giderimi gözlenmezken, pH 7 değerinden sonra Li giderimi gözlenmeye başlamıştır. pH 9 değerinde ise Li giderimi artmaya başlamış ancak pH 11 değerinde ise önemli bir değişim elde edilmemiştir. Benzer şekilde Miyai ve diğ. (1988) tarafından HMnO(Mg) adsorbani kullanılarak yapılan çalışmada, 170 µg.L<sup>-1</sup> giriş Li konsantrasyonunda 4 gün adsorpsiyon süresi ve pH değeri 4'te Li adsorpsiyonu gözlenmez iken, pH değeri 8,9'a kadar arttırıldığında Li adsorpsiyonunun 5,6 mg.g<sup>-1</sup> değerine arttığı görülmüştür [20]. Yine Park ve diğ. (2015) HMnO adsorbani ile 20 mg.L<sup>-1</sup> giriş Li konsantrasyonunda 2 gün adsorpsiyon süresi ve pH değeri 10'a kadar arttırıldığında Li gideriminde artış gözlenmiştir [21]. pH arttıkça Li adsorpsiyonunun artmasının sebebi, MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın yüzey yükünün daha fazla negatif yüklenmesi ve pozitif yüklü olan Li elementi ile adsorban arasındaki elektrostatik çekici gücün artmasından kaynaklanmaktadır [21].

MnO<sub>2</sub> ve Mn kaplı pomza adsorbanları karşılaştırıldığında ise MnO<sub>2</sub> kaplı pomza adsorbani Li gideriminde daha etkili olduğu görülmektedir. En yüksek Li giderimi pH 9 değerinde MnO<sub>2</sub> ve Mn kaplı pomza adsorbanları kullanılarak sırasıyla %37,2 ve %19,6 olarak gözlenmiştir (Şekil 2).

Çözelti içerisindeki Mn konsantrasyonu ölçüm sonuçları incelendiğinde, pH 3 değerinde Mn'nin çözünürlüğü yüksek (12,57 ppm) olup pomza üzerindeki Mn'nin çözünürlüğü artmıştır. pH 7 ve pH 9 değerlerinde ise çözünmüş Mn konsantrasyonu Mn kaplı pomza için sırasıyla 1,69 ve 1,82 ppm iken, MnO<sub>2</sub> kaplı pomza için ise sırasıyla 1,02 ve 1,05 ppm olarak ölçülmüştür. Sonuçlara bakıldığında MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın Li adsorpsiyon verimi daha yüksek ve Mn çözünürlük miktarının ise daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 2).



**Şekil 2.** MnO<sub>2</sub> ve Mn kaplı pomza adsorbanları kullanılarak elde edilen Li giderimi (Başlangıç Li konsantrasyonu: 25 mg.L<sup>-1</sup>, sıcaklık: 35 °C, çalkalama hızı: 125 rpm, pomza miktarı: 2,5 g/100 mL, adsorpsiyon süresi: 1 saat)

### 3.3. Manyetik demir kaplı pomzalar ile farklı pH değerlerinde elde edilen Li giderimi

Günan Yücel (2017) Li iyonlarının sulu çözeltilerden yaş, kuru ve ön işleme tabi tutulmuş *Pichia stipitis* maya hücrelerine ve bu maya hücrelerinin aktif karbonla demir(III) varlığında muamele edilmesiyle elde edilen hibrit adsorbente adsorpsiyonunu incelemiştir [22]. Uygulanan ön işlemlerin mayaların Li adsorpsiyon kapasitesini arttırmadığı belirlenmiş ve yaş ve kuru maya hücreleri ile ticari aktif karbonla demir(III) varlığında hibrit adsorbent oluşturularak Li adsorpsiyonu çalışılmıştır. Buna göre, en uygun hibrit adsorbent üretim koşulları, muamele öncesi başlangıç pH'ı 9,5'e ayarlanmış sulu ortamda, 2 g.L<sup>-1</sup> kuru hücre+0,3 g.L<sup>-1</sup> ticari aktif karbon+0,072 g.L<sup>-1</sup> demir(III)'in 85 rpm'de karıştırılması olarak belirlenmiştir. Her üç adsorbent için de pH 10'da en yüksek Li adsorpsiyon kapasitesi elde edilmiş, başlangıç Li derişiminin 50 mg.L<sup>-1</sup>'ye kadar artırılmasıyla Li adsorpsiyon kapasitesinin arttığı, adsorbent derişiminin 10 g.L<sup>-1</sup>'ye kadar artırılmasıyla Li adsorpsiyon kapasitesinin azaldığı görülmüştür. pH 10'da 50 mg.L<sup>-1</sup> başlangıç Li derişiminde, 2-2,3 g.L<sup>-1</sup> adsorbent derişiminde en yüksek adsorpsiyon kapasite değerleri yaş maya hücreleri için 1,06 mg.g<sup>-1</sup> (134,1 µmol.g<sup>-1</sup>), kuru maya hücreleri için 1,24 mg.g<sup>-1</sup> (178,1 µmol.g<sup>-1</sup>) ve hibrit adsorbent için 1,70 mg.g<sup>-1</sup> (245,3 µmol.g<sup>-1</sup>) olarak belirlenmiştir. Kuru maya hücrelerine ve hibrit adsorbente adsorplanan Li iyonlarının %100 verimle desorplandığı ve bu adsorbentlerin ardarda beş kez kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada, adsorpsiyon sonrası demirin ortamdan kolayca ayrılmasını sağlamak üzere demir kaplı pomza ile yapılan adsorpsiyon çalışmaları yapılmış, ancak Li giderimi verimli elde edilememiştir. Pomza miktarı 7,5 g (100 mL çözelti) ve farklı pH değerlerinde adsorpsiyon çalışması sonuçları Tablo 1'de görülmektedir.

**Tablo 1.** Manyetik demir kaplı pomza ile farklı pH değerlerinde elde edilen Li giderimi (Başlangıç Li konsantrasyonu: 25 mg.L<sup>-1</sup>, sıcaklık: 25 °C, çalkalama hızı: 125 rpm, pomza miktarı: 7,5 g/100 mL, adsorpsiyon süresi: 1 saat)

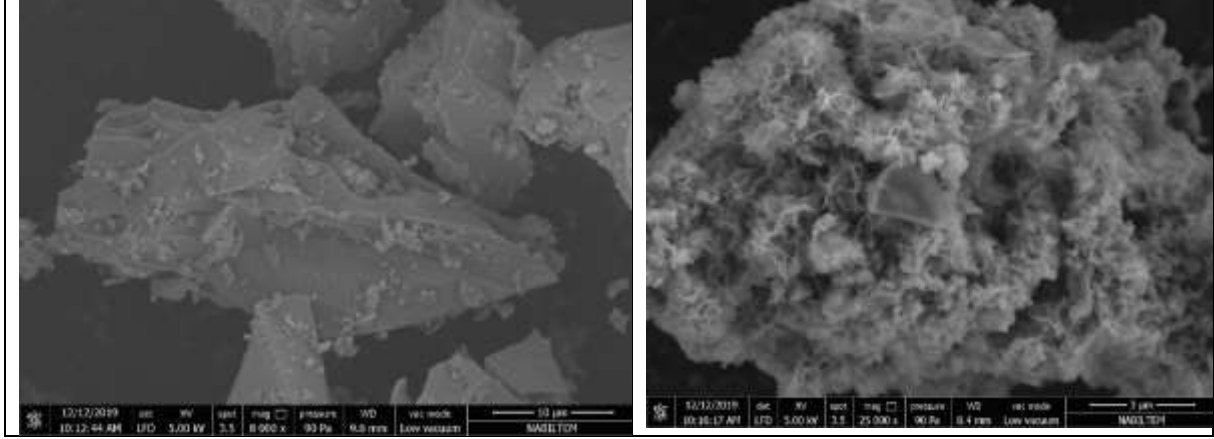
pH	Li Giderimi (%)
3	2,08
4,5	7,08
8	7,79
11,5	10,66



Tablo 1’de görüldüğü üzere pH 11,5 değerine arttırılmasına rağmen Li giderimi %10,66 olarak elde edilmiştir. Demir miktarının arttırılarak ya da farklı adsorbanlar ile hibrit denemelerinin sonraki çalışmalarda planlanması düşünülmüştür.

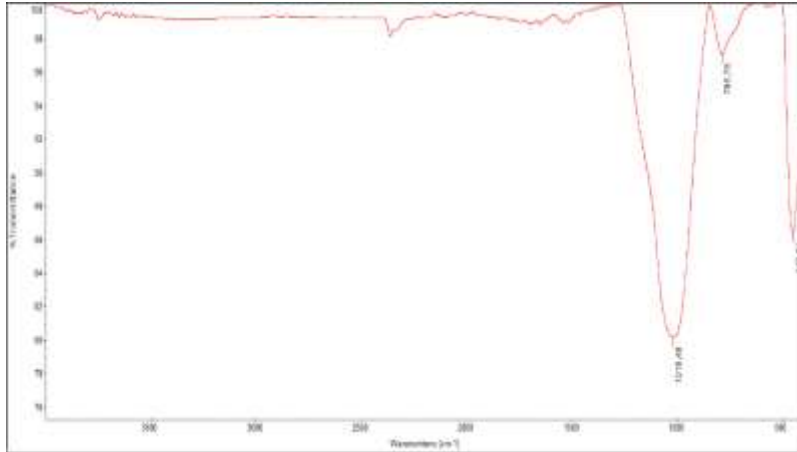
### 3.4. MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın SEM ve FTIR analizi

MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın SEM analizi Şekil 3’de verilmiştir. Buna göre, MnO<sub>2</sub> pomza üzerinde düzensiz bir şekilde kaplanmıştır. EDAX analizine göre ise MnO<sub>2</sub> kaplı pomzada %0,25 oranında Mn bulunmaktadır. Ayrıca MnO<sub>2</sub> kaplı pomzada %13,13 C, %48,11 O, %3,17 Na, %6,54 Al, %26,9 Si, %1,61 K ve %0,28 Ca bulunmaktadır.



Şekil 3. MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın SEM görüntüsü

MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın FTIR analizi Şekil 4’de verilmiştir. Yaklaşık 1020 cm<sup>-1</sup>’de görülen absorpsiyon piki simetrik Si-O-Si gerilmesinden kaynaklanmaktadır [23-24]. Yine yaklaşık 767 cm<sup>-1</sup> ve 449 cm<sup>-1</sup>’de görülen pikler de Si-O-Si veya Si-O-Al bandının gerilme titreşiminden kaynaklanmaktadır. MnO<sub>2</sub> 1510, 1280 ve 1050 cm<sup>-1</sup>’de pik verirken,  $\gamma$ -MnO<sub>2</sub> 1620 cm<sup>-1</sup>’de pik vermektedir [25].



Şekil 4. MnO<sub>2</sub> kaplı pomzanın FTIR analizi

## 4. Sonuçlar

Farklı pomza adsorbanları ile Li adsorpsiyonu çalışmaları gerçekleştirilen bu çalışmada, pomza ve manyetik demir kaplı pomza ile Li giderimi gözlenmemiştir. Ancak Mn kaplı ve MnO<sub>2</sub> kaplı pomza adsorbanları ile yapılan çalışmalarda Li giderimi %40 civarında gerçekleşmiş olup, her iki pomza karşılaştırıldığında en yüksek Li giderimi MnO<sub>2</sub> kaplı pomza adsorbantı ile elde edilmiştir. Farklı adsorpsiyon sürelerinin Li giderimine etkisine bakıldığında

ise ilk 60 dakikalık sürede adsorpsiyonun gerçekleşmiş ve 24 saat sonunda Li gideriminde herhangi bir artış gözlenmemiştir.

Farklı sabit sıcaklıklarda (20 °C ve 35 °C) yapılan adsorpsiyon çalışmalarında MnO<sub>2</sub> kaplı pomza adsorbantı için Li gideriminde sıcaklığın önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

MnO<sub>2</sub> kaplı pomza adsorbantı ile Li gideriminde çözelti pH değerinin önemli bir etkiye sahip olduğu ve asidik koşullarda Li giderimi gözlenmez iken, pH 5'den pH 9'a kadar artırıldığında Li gideriminin %37,2 değerine arttığı tespit edilmiştir. Ancak pH 9 değerinden pH 11 değerine artırıldığında Li gideriminde değişim gözlenmemiştir.

Sonuç olarak, Li geri kazanımı için MnO<sub>2</sub> kaplı pomza malzemesi ile adsorpsiyon yöntemi özellikle deniz suyundan tatlı su eldesi tesislerinde ön arıtma aşamasında uygulanan filtrasyon prosesine uygun bir alternatif oluşturmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Ofisi tarafından destekli "Teknoloji Kritik Elementlerin Çevrede Etkileri ve Pomza Bazlı Yenilikçi Kompozitlerin Kullanıldığı Adsorpsiyon Metodu ile Atıksulardan Giderimi (Teknokompozit)" projesi (NKUBAP.06.GA.17.094) çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, deneysel çalışmalara katkılarından dolayı Burak Sarıgül ve Merve Duran'a, pomza temini için SOYLU LTD.A.Ş. AR-GE Müdürü Bülent Birden'e teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- [1] Hoshino T. Preliminary studies of lithium recovery technology from seawater by electrodialysis using ionic liquid membrane. *Desalination* 2013; 317: 11-16.
- [2] Çifçi Dİ, Adiloğlu S, Terzi S, Meriç S. Nadir toprak elementlerinden olan seryum ve lityumun sucul ve fitotoksik etkilerinin derlenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2019; 8(1): 9-22.
- [3] Chitrakar R, Makita Y, Ooi K, Sonoda A. Lithium recovery from salt lake brine by H<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>. *Dalton Trans* 2014; 43: 8933-8939.
- [4] Işık T, Baba A, Demir MM. Jeotermal ve tuzlu sistemlerden lityum kazanımı. *Jesdergi* 2018; 1: 16-18.
- [5] Tian L, Ma W, Han M. Adsorption behavior of Li<sup>+</sup> onto nano-lithium ion sieve from hybrid magnesium/lithium manganese oxide. *Chem Eng J* 2010; 156: 134-140.
- [6] Wajima T, Munakata K, Uda T. Adsorption behavior of lithium from seawater using manganese oxide adsorbent. *Plasma and Fusion Res* 2012; 7(2405021): 1-4.
- [7] Hawash S, Abd El Kader E, El Diwani G. Methodology for selective adsorption of lithium ions onto polymeric aluminium (III) hydroxide. *J Am Sci* 2010; 6(11): 301-309.
- [8] Navarrete-Guijosa A, Navarrete-Casas R, Valenzuela-Calahorra C, López-González JD, García-Rodríguez A. Lithium adsorption by acid and sodium amberlite. *J Colloid Interf Sci* 2003; 264: 60-66.
- [9] Seron A, Benaddi H, Beguin F, Frackowiak E, Bretelle JL, Thiry MC, Bandosz TJ, Jagiello J, Schwarz JA. Sorption and desorption of lithium ions from activated carbons. *Carbon* 1996; 34(4): 481-487.
- [10] Liu L, Zhang H, Zhang Y, Cao D, Zhao X. Lithium extraction from seawater by manganese oxide ion sieve MnO<sub>2</sub>.0.5H<sub>2</sub>O. *Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects* 2015; 468: 280-284.
- [11] Ryu T, Shin J, Ryu J, Park I, Hong H, Kim B-G, Chung K-S. Preparation and Characterization of a Cylinder-Type Adsorbent for the Recovery of Lithium from Seawater. *Mater Trans* 2013; 54(6): 1029-1033.
- [12] Zhang Q-H, Sun S, Li S, Jiang H, Yu J-G. Adsorption of lithium ions on novel nanocrystal MnO<sub>2</sub>. *Chem Eng Sci* 2007; 62: 4869-4874.
- [13] Zhang Q-H, Li S-P, Sun S-Y, Yin X-S, Yu J-G. Lithium selective adsorption on 1-D MnO<sub>2</sub> nanostructure ion-sieve. *Adv Powder Technol* 2009; 20: 432-437.
- [14] Zhang Q-H, Li S-P, Sun S-Y, Yin X-S, Yu J-G. LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel direct synthesis and lithium ion selective adsorption. *Chem Eng Sci* 2010; 65(1): 169-173.
- [15] Receptoğlu YK, Kabay N, Yılmaz-Ipek İ, Arda M, Yoshizuka K, Nishihama S, Yüksel M. Equilibrium and kinetic studies on lithium adsorption from geothermal water by λ-MnO<sub>2</sub>. *Solvent Extr Ion Exc* 2007; 35(3): 221-231.
- [16] Zandevakili S, Ranjbar M, Ehteshamzadeh M. Recovery of lithium from Urmia Lake by a nanostructure MnO<sub>2</sub> ion sieve. *Hydrometallurgy* 2014; 149: 148-152.
- [17] Kamran U, Heo Y-J, Won Lee J, Park S-J. Chemically modified activated carbon decorated with MnO<sub>2</sub> nanocomposites for improving lithium adsorption and recovery from aqueous media. *J Alloy Compd* 2019; 794: 425-434.
- [18] Çifçi Dİ, Meriç S. A review on pumice for water and wastewater treatment. *Desalin Water Treat* 2016; 57(39): 18131-18143.
- [19] Rusevova K, Kopinke F-D, Georgi A. Nano-sized magnetic iron oxides as catalysts for heterogeneous Fenton-like reactions-Influence of Fe(II)/Fe(III) ratio on catalytic performance. *J Hazard Mater* 2012; 241-242: 433-444.
- [20] Miyai Y, Ooi K, Katoh S. Recovery of lithium from seawater using a new type of ion-sieve adsorbent based on MgMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Separ Sci Technol* 1988; 23(1-3): 179-191.

- [21] Park HJ, Singhal N, Jho EH. Lithium sorption properties of HMnO in seawater and wastewater. *Water Res* 2015; 87: 320-327.
- [22] Günan Yücel H. Lityum(I) adsorpsiyonu için *Pichia Stipitis* mayası ile yeni bir hibrit adsorbent geliştirilmesi. MSc Hacettepe University, Ankara, Turkey, 2017.
- [23] Sepehr MN, Amrane A, Karimaian KA, Zarrabi M, Ghaffar HR. Potential of waste pumice and surface modified pumice for hexavalent chromium removal: Characterization, equilibrium, thermodynamic and kinetic study, *J Taiwan Inst Chem E* 2014; 45: 635-647.
- [24] Khorzughy SH, Eslamkish T, Ardejani FD, Heydartaemeh MR. Cadmium removal from aqueous solutions by pumice and nano-pumice. *Korean J Chem Eng* 2015; 32(1): 88-96.
- [25] Saha S, Pal A. Microporous assembly of MnO<sub>2</sub> nanosheets for malachite green degradation, *Separ Purif Technol* 2014; 134: 26-36.

## Çörek Otu Posasının Aktif Karbon Üretiminde Değerlendirilmesi

Sibel ASLAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye  
\*<sup>1</sup> sibela@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 07/08/2020;

Kabul/Accepted: 23/11/2020)

**Öz:** Çörek otu posası; çörek otundan yağ ekstrakte edildikten sonra geriye kalan kalıntıdır. Bu çalışmada zirai endüstriyel bir atık olan çörek otu posası aktif karbon üretimi amacıyla öncül madde olarak kullanılmıştır. Aktif karbon üretiminde kimyasal aktivasyon işlemi uygulanmıştır. Aktifleştirici madde olarak  $ZnCl_2$  kullanılmıştır. Farklı  $ZnCl_2$  emdirme oranlarında (1:1 ve 2:1) ve 500 °C'lik aktivasyon sıcaklığında aktif karbon üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen aktif karbon örneklerinin yapısal ve morfolojik karakterizasyonu BET, FTIR, XRD ve  $pH_{pzc}$  analizleri ile yapılmıştır. 1:1 (AK1) ve 2:1 (AK2) emdirme oranlarında elde edilen aktif karbon örneklerinin yüzey alanları sırasıyla 505.073 m<sup>2</sup>/g ve 276.563 m<sup>2</sup>/g olarak bulunmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar çörek otu posasının aktif karbon üretimi için uygun bir öncül madde olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Çörek otu posası, aktif karbon, kimyasal aktivasyon, çinko klorür ( $ZnCl_2$ ).

### Valorization of Black Cumin Pulp in the Activated Carbon Production

**Abstract:** Black cumin pulp is a residue remaining after oil extraction from black cumin. In this study, black cumin pulp, an agro-industrial waste, was used for the production of activated carbon as a precursor material. In the activated carbon production, the chemical activation process was applied.  $ZnCl_2$  was used as an activating agent. Activated carbon production was carried out at different  $ZnCl_2$  impregnation rates (1:1 and 2:1) and an activation temperature of 500 °C. The structural and morphological characterization of the activated carbon samples obtained were performed by BET, FTIR, XRD, and  $pH_{pzc}$  analysis. BET surface areas of activated carbon samples obtained at impregnation ratios of 1:1 (AC1) and 2:1 (AC2) were found to be 505.073 m<sup>2</sup>/g and 276.563 m<sup>2</sup>/g, respectively. The results from the study demonstrated that the black cumin pulp is an appropriate precursor for activated carbon production.

**Key words:** Black cumin pulp, activated carbon, chemical activation, zinc chloride ( $ZnCl_2$ ).

#### 1. Giriş

Aktif karbon büyük yüzey alanı, mikro gözenekli yapı, yüksek gözenek hacmi ve yüksek yüzey reaktivitesine sahip karbonlu bir malzemedir. Aktif karbon çok yönlü ve mükemmel bir adsorbenttir [1-4]. Aktif karbonun önemli uygulama alanları endüstriyel atıksuların arıtılması, içme suyundan renk, koku ve tat ile istenmeyen diğer organik ve inorganik kirleticilerin adsorptif olarak uzaklaştırılması, hava temizleme, birçok kimyasal, gıda ve farmasötik ürünün saflaştırılması, çeşitli gaz fazı uygulamaları, enerji depolama, elektrokimyasal uygulama ve katalizdir [2, 5]. Aktif karbonun maliyetinin yüksek olması araştırmacıları farklı hammaddelerden aktif karbon üretimi ile ilgili çalışmalara yönlendirmiştir. Son yıllarda özellikle tarımsal atıklardan aktif karbon üretimi önem kazanmıştır.

Aktif karbon üretiminde kullanılacak karbonlu öncül maddenin seçiminde göz önünde bulundurulacak kriterler arasında yüksek karbon ve düşük inorganik madde içeriği, işlenebilirlik, çevresel etki ve yüksek kalitede aktif karbon elde etme potansiyeli bulunmaktadır [6].

Aktif karbon karbonlu materyallerin fiziksel veya kimyasal olarak aktifleştirilmesi ile üretilmektedir. Fiziksel aktivasyon başlangıç materyalinin karbonizasyonunu ve daha sonra buhar veya karbondioksit ile aktivasyonunu kapsar. Kimyasal aktivasyonda ise materyale aktifleştirici kimyasal madde emdirilir [7]. Kimyasal aktivasyonda çinko klorür, fosforik asit, alüminyum klorür, magnezyum klorür, potasyum hidroksit, sodyum hidroksit gibi çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Bunlar arasında çinko klorür ( $ZnCl_2$ ) en yaygın kullanılanlardan biridir [8].

Çörek otu (*Nigella Sativa* L.) *Ranunculacea* ailesine ait küçük, siyah bir yıllık otsu bir bitkidir ve aromatik bir koku ve tada sahiptir [9]. Çörek otu Güney Avrupa, Kuzey Afrika ve Güneybatı Asya'ya özgüdür ve Orta Doğu Akdeniz Bölgesi, Güney Avrupa, Hindistan, Pakistan, Suriye, Türkiye, Suudi Arabistan gibi dünyanın birçok

\* Sorumlu yazar: [sibela@firat.edu.tr](mailto:sibela@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup>0000-0003-3454-798X

ülkesinde yetiştirilmektedir [10]. Ülkemizde ise Burdur, Isparta, Afyon, Amasya, İstanbul, Gaziantep, Kahramanmaraş, Bursa, Konya, Samsun, Kütahya, Nevşehir, ve Mersin illerinde çörek otu yetiştiriciliği yapılmaktadır [11, 12]. Bölgenin iklimine bağlı olarak farklılık göstermekle birlikte çörek otu tohumlarının yapısında, uçucu yağlar (% 0.4-0.45), sabit yağlar (% 32-40) proteinler (% 16-19.9), amino asitler, alkaloidler, tanenler, saponinler, lifler (5.5%), karbonhidratlar (% 33.9), mineraller (% 1.79-3.44), askorbik asit, tiamin, niasin, pridoksin ve folik asit bulunmaktadır [13].

Çörek otunun tohumları ve yağı dünya çapında çeşitli hastalıkların tedavisinde asırlardır yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Ağrı kesici, antienflamatuvar, antialerjik, diüretik, antihipertansif, antidiyabetik, antikanser ve bağışıklık sistemini düzenleyici, antimikrobiyal, antihelmintik, spazmolitik, bronkodilatör, mide koruyucu, karaciğer koruyucu, böbrek koruyucu ve antioksidan özelliklere sahiptir [10, 14, 15]. Tedavi edici özellikleri uçucu yağın başlıca aktif kimyasal bileşimi olan timokinonun varlığı sayesinde [10]. Ayrıca çörek otu tohumları baharat ve gıda koruyucu olarak da kullanılmaktadır [16]. Çörek otu tohumlarından yağın ekstraksiyonu için solvent kullanımı, ısı işlem, hidrodistilasyon, elektriksel alan/mikrodalga, süperkritik karbon dioksit (sCO<sub>2</sub>) gibi yöntemler mevcut olmakla birlikte, en yaygın olarak kullanılan soğuk pres yöntemidir [17, 18, 19]. Kiani vd. [20] tarafından yapılan çalışmada 2019 yılında İran'ın farklı bölgelerinden toplanan çörek otu tohumlarının yağ içeriklerinin %19.179 ile %30.046 arasında değiştiği bulunmuştur. Matthaus ve Özcan [21] tarafından yapılan çalışmada incelenen çörek otu tohumlarının yağ içerikleri %30.4 ile %36.4 arasında bulunmuştur. Çörek otu yağı üretimi esnasında, kullanılan çörek otu tohumunun bileşimine ve ekstraksiyon yöntemine bağlı olarak, işlem gören çörek otu tohumunun yaklaşık %70-80'i posa olarak kalmaktadır [22]. Dolayısıyla büyük miktarda kalan bu posanın uygun şekilde değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Türkiye'de 2012 yılında 2299 da alanda 161 ton çörek otu üretilirken, 2019 yılında 37085 da alanda 3603 ton çörek otu üretilmiştir [23].

Çörek otu tohumları son birkaç yılda adsorbent olarak büyük ilgi görmektedir. Siddiqui vd. [24] yaptıkları çalışmada asitle yıkadıkları çörek otu tohumlarını sulu çözeltiden metilen mavisinin gideriminde adsorbent olarak kullanmışlardır. Thabede vd. [25] çörek otu tohumlarını karbonize etmişler (CBC) ve daha sonra %10 ve %20'lik sülfürik asitle 200 °C'de aktifleştirmişlerdir (ACBC-10 ve ACBC-20). Abdel-Ghani vd. [26] çörek otu atığından hazırladıkları manyetik aktif karbon nanokompoziti üzerinde Coomassie parlak mavi boyasının adsorpsiyonunu incelemişlerdir. Manyetik aktif karbonun yüzey alanı ve toplam boşluk hacmi sırasıyla 106.4 m<sup>2</sup>/g ve 0.220 g/cm<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Thabede vd. [27] 300 °C'lik sıcaklıkta karbonize ettikleri çörek otunu daha sonra %10 ve %20'lik sülfürik asitle aktifleştirmişler ve bu üç adsorbenti (BCC, BCAC-10 ve BCAC-20) sulu çözeltiden metilen mavisini ve kurşun iyonlarının adsorpsiyonunda kullanmışlardır. BCC, BCAC-10 ve BCAC-20 örneklerinin BET yüzey alanları sırasıyla 11.67, 20.14 ve 21.54 m<sup>2</sup>/g olarak bulunmuştur. Rakass vd. [28] farklı şartlar altında modifiye ettikleri çörek otu tohumlarını sulu çözeltiden metilen mavisinin gideriminde kullanmışlardır.

Bu çalışmanın amacı çörek otundan yağ ekstrakte edildikten sonra geriye kalan posanın aktif karbon üretiminde değerlendirilmesidir. Bu amaçla çörek otu posası farklı emdirme oranlarında çinko klorür ile kimyasal olarak aktifleştirilmiştir. Elde edilen aktif karbon örnekleri BET, FTIR, XRD ve pH<sub>pzc</sub> analizleri ile yapısal ve morfolojik olarak karakterize edilmiştir.

## 2. 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Materyaller

Çörek otu posası Elazığ'da bulunan ticari bir işletmeden alınmıştır. Çörek otu posası safsızlıklarını gidermek amacıyla, öncelikle sıcak daha sonra soğuk distile suyla yıkanmış ve nem içeriğini gidermek amacıyla etüvde 105 °C'de 24 sa. kurutulmuştur. Kurutulan çörek otu numuneleri öğütücüde öğütülmüş ve daha sonra 20 meshlik elekten geçirilerek aktif karbon üretiminde kullanılmak üzere saklanmıştır. Çalışmada kullanılan ZnCl<sub>2</sub> Merck firmasından temin edilmiştir.

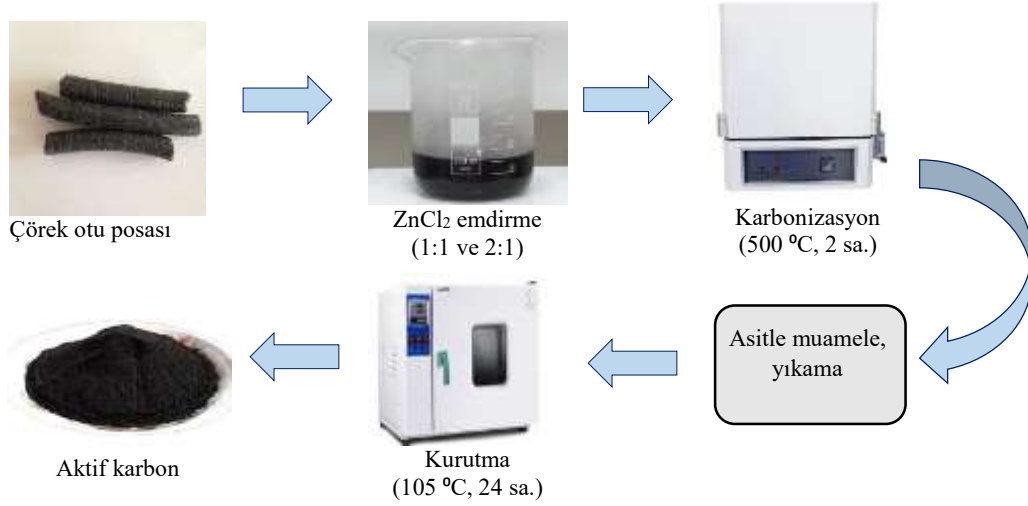
### 2.2. Aktif Karbon Üretimi

Aktif karbon sentezinde Uğurlu vd. [29] tarafından kullanılan yöntem modifiye edilerek uygulanmıştır. Aktif karbon sentezi Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Ön işlemlerden geçirilmiş 40 g çörek otu posasına 1:1 (AK1) ve 2:1 (AK2) oranında ZnCl<sub>2</sub> emdirilmiştir. Emdirme oranı ZnCl<sub>2</sub> ağırlığının çörek otu posasının ağırlığına oranıdır. Emdirme işlemi uygulanan numuneler 70 °C'de su banyosunda 24 saatlik bir temas süresince karıştırılmış ve elde edilen homojen karışım daha sonra etüvde 105 °C'de 24 sa. kurutulmuştur. Kurutulan örnekler paslanmaz çelikten yapılmış silindirik reaktöre yerleştirilmiştir. Kül fırınında 150 cm<sup>3</sup>/dk. azot gazı debisinde 5 °C/dk. sıcaklık artış hızıyla 500 °C'de 2 sa. karbonize edilmiştir. Karbonize edilen numuneler 1 M HCl çözeltisi ile yıkandıktan

sonra distile su ile yıkama çözeltisinin pH'ı nötr oluncaya kadar yıkanmıştır. Daha sonra aktif karbon örnekleri 105 °C'de 24 sa. kurutulmuştur.

### 2.3. Karakterizasyon Çalışmaları

Çörek otu posası ve elde edilen aktif karbon örneklerinin elementel analizi Leco TruSpec Micro elementel analiz cihazı ile yapılmıştır. BET yüzey alanı ve gözenek dağılım tayini Quantachrome Autosorb iQ2 cihazı ile yapılmıştır. X-ışını difraktometre (XRD) analizi SmartLab Rigaku X-ışını difraktometresinde Cu K $\beta$  radyasyonu ( $\lambda= 1.5418 \text{ \AA}$ ) ve D/teX Ultra 250 dedektörüyle yapılmıştır. XRD ölçümleri, 3.0352 derece/dk. tarama hızında sürekli tarama yöntemi uygulanarak yapılmıştır. Çörek otu posasının ve aktif karbon örneklerinin yüzey yapısını ve fonksiyonel gruplarını incelemek amacıyla FTIR analizi yapılmıştır. Analizler Thermo Scientific™ Nicolet™ iS5 model FTIR cihazı ile 600-4000  $\text{cm}^{-1}$  aralığında yapılmıştır. Partikül büyüklüğü analizi Malvern Mastersizer 3000 cihazı ile yapılmıştır.  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  analizinde Bohli vd. [30] tarafından verilen yöntem kullanılmıştır. pH ölçümleri dijital pH metre (XS pH 50+ DHS) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Aktif karbon hazırlanmasında uygulanan akım şeması.

## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Aktif Karbon Verimi

Aktif karbonun verimi üretilen aktif karbonun ağırlığının başlangıçta kullanılan malzemenin ağırlığına oranı olarak ifade edilir. Aktif karbon üretim verimi 1:1 ve 2:1 emdirme oranları için sırasıyla %15 ve %16 olarak bulunmuştur. Aljundi ve Jarrah [1] pirinadan kimyasal aktivasyonla ( $\text{ZnCl}_2$ ) aktif karbon üretmişlerdir. 3:1 emdirme oranında verim değerini %18 olarak bulmuşlardır. Aravindhana vd. [31] deniz makroalg biyokütlesinden  $\text{ZnCl}_2$  aktivasyonu ile aktif karbon ürettikleri çalışmalarında,  $\text{ZnCl}_2$  emdirme oranı %10'dan %30'a arttığı zaman verimin %27.35'den %32.42'ye arttığını gözlemlemişlerdir. Verimdeki artış  $\text{ZnCl}_2$ 'nin öncül materyaldeki hidrokarbonlar veya oksijenli organik bileşenlerden ziyade H ve O'ı seçici olarak ayırmasına bağlanmaktadır [31, 32].

### 3.2. Elementel Analiz

Çörek otu posası ve aktif karbon örneklerinin elementel analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Çörek otu posasının karbon içeriği %50.35’tir. Aktif karbon üretimi için uygun karbon içeriği %40-80 arasında olduğundan çörek otu posasının aktif karbon üretimi için uygun bir öncül madde olduğu söylenebilir. Elementel analiz sonuçlarından görülebileceği gibi emdirme oranındaki artışla aktif karbonun karbon içeriği artmıştır. Kimyasal aktivasyonda  $ZnCl_2$  uygulanması selülozik materyalin ayrışmasına, karbonizasyon sırasında dehidrasyona ve aromatik grafitik yapının oluşması sayesinde karbon içeriğinin artmasına yol açar [33, 34].

**Tablo 1.** Çörek otu posası ve aktif karbon örneklerinin elementel analiz sonuçları.

Numune	%C	%H	%N	%S	%O
Çörek otu Posası	50.35	7.38	5.18	-	37.09
AK1	74.13	2.23	3.91	-	19.73
AK2	77.56	2.84	3.11	-	16.49

### 3.3. BET Yüzey Alanı ve Partikül Büyüklüğü

Çörek otu posasından farklı emdirme oranlarında elde edilen aktif karbon örneklerinin BET yüzey alanları ve yapısal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. AK1 ve AK2’nin BET yüzey alanları sırasıyla 505.073  $m^2/g$  ve 276.563  $m^2/g$  olarak bulunmuştur. Emdirme oranı 1:1’den 2:1’e artınca BET yüzey alanı azalmıştır. Benzer bir durum hurma çekirdeklerinden kimyasal aktivasyonla aktif karbon üreten El Aboudi vd. [35]’nin çalışmasında da gözlenmiştir.

Şekil 2’de AK1 örneğine ait azot adsorpsiyon-desorpsiyon grafiği verilmektedir. AK1’in adsorpsiyon izotermi International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) sınıflandırmasına göre Tip I ve Tip IV’e uymaktadır. Bu durum aktif karbonda mikro gözeneklerin ve mezo gözeneklerin varlığını göstermektedir. IUPAC sınıflandırmasına göre Tip I izoterm tipik olarak nispeten küçük bir dış yüzeye sahip mikro gözenekli numunelere özgü iken, Tip IV izoterm mezo gözenekli malzemelerde görülen bir özelliktir [36, 37].

Tablo 2’den görülebileceği gibi emdirme oranı arttıkça toplam gözenek hacmi artmıştır. Kimyasalın girişiminin daha büyük olduğu yüksek emdirme oranlarında aktif karbonun gözenek hacmi de artar [8]. Karbonizasyon sırasında dehidrasyon ajanı olarak davranan  $ZnCl_2$ , karbon iskeletinin kömürleşmesine ve gözenekli bir yapının oluşmasına yol açmaktadır [38]. Yorgun vd. [39]’nin  $ZnCl_2$  aktivasyonu ile Paulownia ağacından aktif karbon ürettikleri çalışmada da emdirme oranı arttıkça gözenek hacmi artmıştır. Her iki aktif karbon örneğinin mikro gözenek alanı mezo gözenek alanından daha yüksektir. AK1 örneğinin mikro gözenek hacmi daha yüksek iken, AK2 örneğinin mezo gözenek hacmi yüksektir. Mikro gözenek alanı ve hacmi artan emdirme oranı ile büyük ölçüde azalmıştır. Mikro gözeneklerin fazla olduğu aktif karbonlar küçük moleküllü kirlenmelerin adsorpsiyonunda kullanılırken, mezo gözeneklerin fazla olduğu aktif karbonlar ise büyük moleküllerin adsorpsiyonunda kullanılır [3]. Artan emdirme oranı ile birlikte mikro gözenek hacmi yüzdesi %72.20’den %21.31’e düşmüştür.

AK1 ve AK2’nin %50 ve %90’ının partikül büyüklüğü sırasıyla 909  $\mu m$  ve 2160  $\mu m$ , 443  $\mu m$  ve 2100  $\mu m$  olarak ölçülmüştür.

Çörek otunun ve çörek otundan elde edilen aktif karbonların mukayesesi Tablo 3’de verilmiştir. Bu çalışmada elde edilen aktif karbonların yüzey alanları diğer çalışmalardakine kıyasla oldukça yüksektir.

**Tablo 2.** Aktif karbon örneklerinin BET yüzey alanları ve gözenek yapıları.

Aktif Karbon	$S_{BET}$ ( $m^2/g$ )	$S_{mikro}$ ( $m^2/g$ )	$S_{mezo}$ ( $m^2/g$ )	$V_{toplam}$ ( $cm^3/g$ )	$V_{mikro}$ ( $cm^3/g$ )	$V_{mezo}$ ( $cm^3/g$ )	Ortalama por çapı (Å)
AK1	505.073	424.269	80.804	0.2701	0.195	0.0751	10.6966
AK2	276.563	170.144	106.419	0.3801	0.081	0.2991	22.2785

### 3.4. Yüzeysel Fonksiyonel Gruplar

Çörek otu posası ve aktif karbon örneklerinin FTIR spektrumları Şekil 3’de verilmiştir. Çörek otu posasında gözlenen  $3283\text{ cm}^{-1}$ ’deki pik –OH gerilme frekansına atfedilebilir [24].  $2922\text{ cm}^{-1}$  ve  $2853\text{ cm}^{-1}$ ’deki pikler metil ve metilen grupların varlığından ileri gelir [14, 25, 40, 41,].  $1743\text{ cm}^{-1}$ ’deki ve  $1709\text{ cm}^{-1}$ ’deki pikler ketonik grubun –C=O gerilme titreşimine atfedilir [25, 41].  $1649\text{ cm}^{-1}$  ve  $1540\text{ cm}^{-1}$ ’deki pikler amid gruplarının C=O ve N-H bağlarından kaynaklanır [24].  $1415\text{ cm}^{-1}$ ’deki pik karboksilik grubun –OH eğilme titreşimine işaret eder [41].  $1236\text{ cm}^{-1}$  ve  $1155\text{ cm}^{-1}$ ’deki pikler -CO grubundan dolayıdır [27]. Çörek otunda bulunan bazı pikler aktivasyon işleminden sonra elde edilen aktif karbon örneklerinde gözlenmemiştir.

$\text{pH}_{\text{pzc}}$  değeri adsorbentın net yüzey yükünün sıfır olduğu noktadaki pH değeri olarak tanımlanır. Bu değer adsorbentın asidik veya bazik karakterde olduğunu gösterdiği için özellikle adsorpsiyon proseslerinde göz önüne alınmalıdır. Çörek otu posası, AK1 ve AK2 örneklerinin  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  değerleri sırasıyla 7.20, 4.22 ve 3.20 olarak bulunmuştur. Elde edilen aktif karbon örnekleri asidik bir yapıdadır.

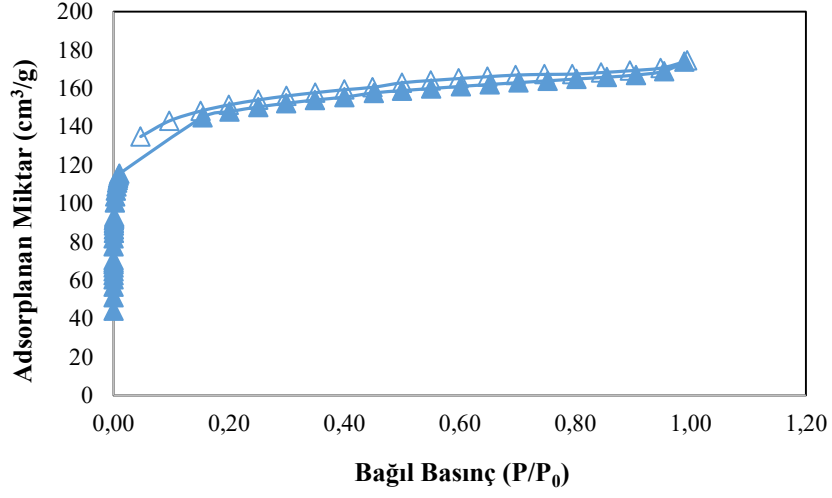
**Tablo 3.** Çörek otu bazlı adsorbentlerin özellikleri.

Adsorbent	$S_{\text{BET}}$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	$\text{pH}_{\text{pzc}}$	Ortalama por çapı (nm)	Kaynaklar
Asitle yıkanmış çörek otu tohumu	-	2.00	-	Siddiqui vd. [24]
CBC	-	5.7	-	Thabede vd. [25]
ACBC-10	-	2.3	-	
ACBC-20	-	2.3	-	
BCC	11.67	6.22	3.78 nm	Thabede vd. [27]
BCAC-10	20.14	2.10	6.81 nm	
BCAC-20	21.54	2.00	7.13 nm	
Manyetik aktif karbon nanokompozit	106.4	-	-	Abdel-Ghani vd. [26]

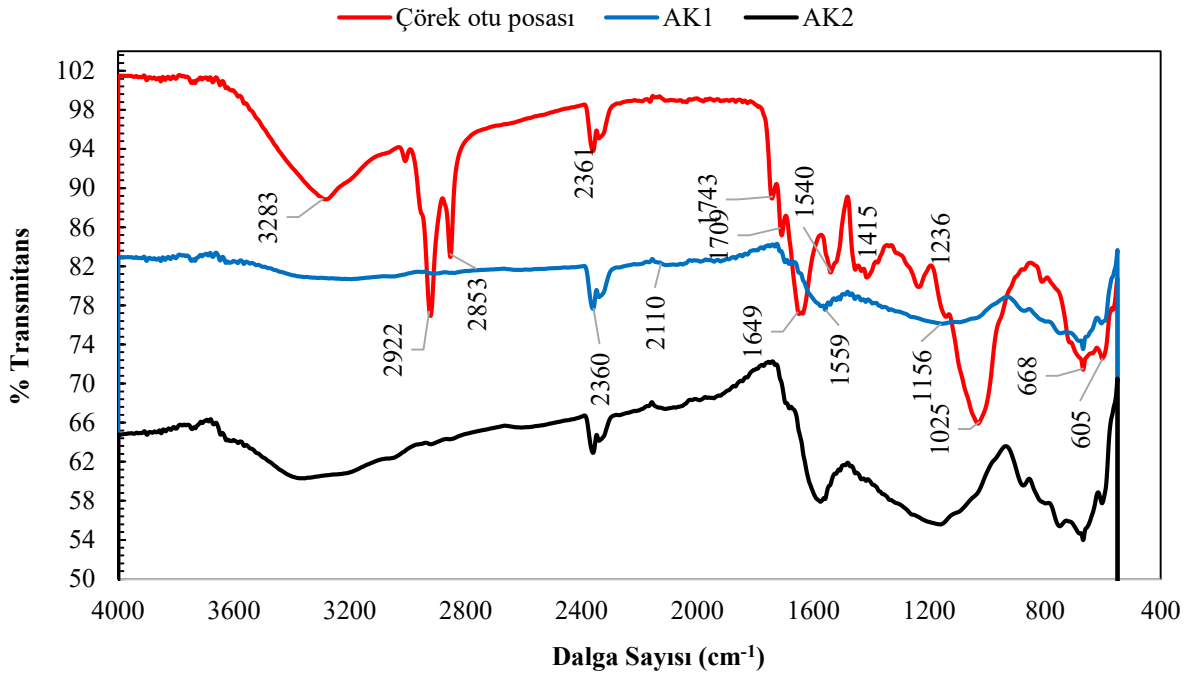
### 3.5. XRD Analizi

Çörek otu posası ve AK1 örneğinin X-ışını difraksiyon modelleri Şekil 4’de verilmiştir. Çörek otu posasında  $21^\circ$ ’lik  $2\theta$  değerindeki geniş pik çörek otunun selülozik içeriğinin göstergesidir. Bu pik aktif karbondaki kaybolmuştur. Aktif karbondaki  $26^\circ$ ’de gözlenen pik aktif karbonun amorf yapısına işaret eder. Biyokütle atıklarından elde edilen aktif karbonlar genellikle amorf yapıdadır [42-44].

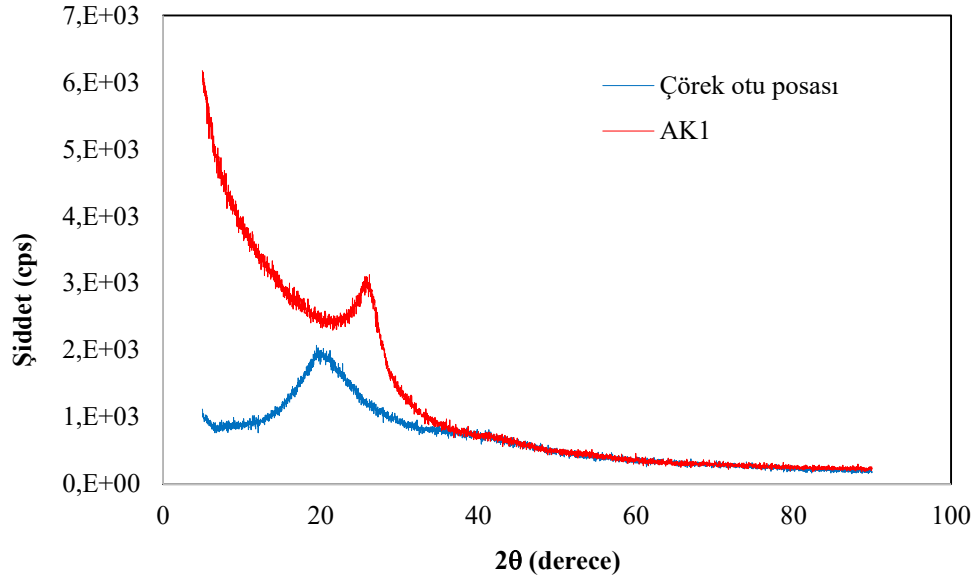




Şekil 2. Çörek otu posasından elde edilen AK1 örneğine ait azot adsorpsiyon-desorpsiyon izotermi (▲: Adsorpsiyon, Δ: Desorpsiyon).



Şekil 3. Çörek otu posası ve aktif karbon örneklerinin FTIR spektrumları.



Şekil 4. Çörek otu posası ve AK1 örneğinin XRD modelleri.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada çörek otundan yağ ekstrakte edildikten sonra geriye kalan posa aktif karbon üretiminde hammadde olarak kullanılmıştır. Çörek otu posası  $ZnCl_2$  ile farklı emdirme oranlarında kimyasal olarak aktifleştirilmiştir. 1:1 (AK1) ve 2:1'lik (AK2) emdirme oranlarında elde edilen aktif karbon örneklerinin BET yüzey alanları sırasıyla  $505.073 \text{ m}^2/\text{g}$  ve  $276.563 \text{ m}^2/\text{g}$  olarak bulunmuştur. Ticari aktif karbonun yüzey alanı  $500\text{-}1500 \text{ m}^2/\text{g}$  arasındadır. AK1 aktif karbon örneğinin yüzey alanı da bu aralıktadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, atık bir madde olan çörek otu posasının düşük maliyetli aktif karbon üretiminde öncül materyal olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Aljundi IH, Jarrah N. A study of characteristics of activated carbon produced from Jordanian olive cake. *J Anal Appl Pyrol* 2008; 81: 33–36.
- [2] Rezma S, Birot M, Hafiane A, Deleuze H. Physically activated microporous carbon from a new biomass source: Date palm petioles. *CR Chim* 2017; 20: 881–887.
- [3] Kumar A, Jena HM. Preparation and characterization of high surface area activated carbon from Fox nut (*Euryale ferox*) shell by chemical activation with  $H_3PO_4$ . *Results Phys* 2016; 6: 651–658.
- [4] Annab H, Fiol N, Villaescusa I, Essamri A. A proposal for the sustainable treatment and valorisation of olive mill wastes. *J Environ Chem Eng* 2019; 7: 102803.
- [5] Bansal RC, Goyal M. *Activated Carbon Adsorption*. Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis Group, CRC Press, 2005.
- [6] Saleem J, Shadid UB, Hijab M, Mackey H, McKay G. Production and applications of activated carbons as adsorbents from olive stones. *Biomass Convers Biorefin* 2019; 9: 775–802.
- [7] Yakout SM, El-Deen GS. Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones. *Arab J Chem* 2016; 9: S1155–S1162.
- [8] Molina-Sabio M, Rodríguez-Reinoso F. Role of chemical activation in the development of carbon porosity. *Colloid Surface A* 2004; 241: 15–25.
- [9] Abdel Rahman, HH, Moustafa AHE, Kassem MG. Black cumin (*Nigella sativa*) as low cost biosorbent for the removal of toxic Cu (II) and Pb (II) from aqueous solutions. *Int J Eng Technol IJET-IJENS* 2015; 15(02): 46–66.
- [10] Ahmad A, Husain A, Mujeeb M, Khan SA, Najmi AK, Siddique NA, Damanhoury ZA, Anwar F. A review on therapeutic potential of *Nigella sativa*: A miracle herb. *Asian Pac J Trop Biomed* 2013; 3(5): 337–352.
- [11] Koşar İ, Özel A. Çörekotu (*Nigella sativa* L.) çeşit ve popülasyonlarının karakterizasyonu: I. Tarımsal özellikler. *Harran Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi* 2018; 22(4): 533-543.

- [12] Kılıç C, Arabacı O. Çörek otu (*Nigella sativa* L.)’nda farklı ekim zamanı ve tohumluk miktarının verim ve kaliteye etkisi. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2016; 13(2): 49–56.
- [13] Bacak Güllü E, Avcı G. Timokinon: *Nigella Sativa*’nın biyoaktif komponenti. Kocatepe Vet J 2013; 6(1): 51–61.
- [14] Ahmad R, Haseeb S. Black cumin seed (BCS): A non conventional adsorbent for the removal of Cu (II) from aqueous solution. Desalin Water Treat 2014; 56(9): 1–10.
- [15] Rezaei-Chiyaneh E, Seyyedi SM, Ebrahimian E, Moghaddam SS, Damalas CA. Exogenous application of gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates the effect of water deficit stress in black cumin (*Nigella sativa* L.). Ind Crop Prod 2018; 112: 741–748.
- [16] Al-Kayssi AW, Shihab RM, Mustafa SH. Impact of soil water stress on Nigellone oil content of black cumin seeds grown in calcareous-gypsiferous soils. Agr Water Manage 2011; 100: 46–57.
- [17] Bulca S. Çörek otunun bileşenleri ve bu yağın ve diğer bazı uçucu yağların antioksidan olarak gıda teknolojisinde kullanımı. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi 2014; 11(2): 29 – 36.
- [18] Keykubat B. Tıbbi aromatik bitkiler ve iyi yaşam. İzmir Ticaret Borsası Ar-Ge Müdürlüğü 2016; 1–23.
- [19] Subratti A, Lalghe LJ, Jalsa NK. Efficient extraction of black cumin (*Nigella sativa* L.) seed oil containing thymol, using liquefied dimethyl ether (DME). J Food Process Preserv 2019; 43(4): 13913.
- [20] Kiani M, Alahdadi I, Soltani E, Boelt B, Benakashan F. Variation of seed oil content, oil yield, and fatty acids profile in Iranian *Nigella sativa* L. landraces. Ind Crop Prod 2020; 149: 112367.
- [21] Matthaus B, Özcan MM. Fatty acids, tocopherol, and sterol contents of some *Nigella* species seed oil. Czech J Food Sci 2011; 29(2): 145–150.
- [22] Şen N, Kar Y. Pyrolysis of black cumin seed cake in a fixed-bed reactor. Biomass Bioenerg 2011; 35: 4297-4304.
- [23] <http://www.tuik.gov.tr>
- [24] Siddiqui SI, Rathi G, Chaudhry SA. Acid washed black cumin seed powder preparation for adsorption of methylene blue dye from aqueous solution: Thermodynamic, kinetic and isotherm studies. J Mol Liq 2018; 264: 275–284.
- [25] Thabede PM, Shooto ND, Xaba T, Naidoo EB. Sulfuric activated carbon of black cumin (*Nigella sativa* L.) seeds for the removal of cadmium(II) and methylene blue dye. Asian J Chem 2020; 32(6): 1361–1369.
- [26] Abdel-Ghani NT, El-Chaghaby GA, Rawwash E-SA, Lima EC. Magnetic activated carbon nanocomposite from *Nigella sativa* L. waste (MNSA) for the removal of Coomassie brilliant blue dye from aqueous solution: Statistical design of experiments for optimization of the adsorption conditions. J Adv Res 2019; 17: 55–63.
- [27] Thabede PM, Shooto ND, Naidoo EB. Removal of methylene blue dye and lead ions from aqueous solution using activated carbon from black cumin seeds. S Afr J Chem Eng 2020; 33: 39–50.
- [28] Rakass S, Mohmoud A, Hassani HO, Abboudi M, Kooli F, Wadaani FA. Modified *Nigella sativa* seeds as a novel efficient natural adsorbent for removal of methylene blue dye. Molecules 2018; 23: 23081950.
- [29] Uğurlu M, Gürses A, Doğan Ç. Adsorption studies on the treatment of textile dyeing effluent by activated carbon prepared from olive stone by ZnCl<sub>2</sub> activation. Color Technol 2007; 123: 106–114.
- [30] Bohli T, Fiol N, Villaescusa I, Ouederni A. Adsorption on activated carbon from olive stones: Kinetics and equilibrium of phenol removal from aqueous solution. J Chem Eng Process Technol 2013; 4(6): 1-5.
- [31] Aravindhan R, Raghava Rao J, Unni Nair B. Preparation and characterization of activated carbon from marine macroalgal biomass, J Hazard Mater 2009; 162: 688–694.
- [32] Hu Z, Srinivasan MP, Ni Y. Novel activation process for preparing highly microporous and mesoporous activated carbons. Carbon 2001; 39: 877–886.
- [33] Olivares-Marín M, Fernández-González C, Macías-García A, Gómez-Serrano V. Preparation of activated carbon from cherry stones by chemical activation with ZnCl<sub>2</sub>. Applied Surface Science 2006; 252(17): 5967–5971.
- [34] Hock PE, Zaini MAA. Activated carbons by zinc chloride activation for dye removal– A commentary. Acta Chimica Slovaca 2018; 11(2): 99–106.
- [35] El Aboudi I, Annab H, Mdarhri A, Amjoud M, Servant L. Activated carbon synthesis using Moroccan dates stones as precursor and application for wastewater treatment. J Mater Environ Sci 2017; 8(4): 1483–1481.
- [36] Sing KSW, Everett DH, Haul RAW, Moscou L, Pierotti RA, Rouquérol J, Siemieniowska, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. Pure Appl Chem 1985; 57(4): 603–619.
- [37] Thommes M, Kaneko K, Neimark AV, Olivier JP, Rodriguez-Reinoso F, Rouquerol J, Sing KSW. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure Appl Chem 2015; 87 (9–10): 1051–1069.
- [38] Liou TH. Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation. Chem Eng J. 2010; 158:129–142.
- [39] Yorgun S, Vural N, Demiral H. Preparation of high-surface area activated carbons from Paulownia wood by ZnCl<sub>2</sub> activation. Micropor Mesopor Mat 2009; 122: 189–194.
- [40] Oliveira RN, Mancini MC, Oliveira FCS, Passos TM, Quilty B, Thire RMS, McGuinness GB. FTIR analysis and quantification of phenols and flavonoids of five commercially available plants extracts used in wound healing. Matéria (Rio de Janeiro) 2016; 21: 767–779.
- [41] Siddiqui SI, Chaudhry SA. *Nigella sativa* plant based nanocomposite-MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/BC: An antibacterial material for water purification. J Clean Prod 2018; 200: 996–1008.

- [42] Galiatsatou P, Metaxas M, Kasselouri-Rigopoulou V. Mesoporous activated carbon from agricultural byproducts. *Mikrochim Acta* 2001; 136: 147–152.
- [43] Djilani C, Zaghdoudi R, Modarressi A, Rogalski M, Djazi F, Lallam A. Elimination of organic micropollutants by adsorption on activated carbon prepared from agricultural waste. *Chem Eng J* 2012; 189-190: 203–212.
- [44] Djeridi W, Ouederni A, Mansour NB, Llewellyn PL, Alyamanic A, El Mir L. Effect of the both texture and electrical properties of activated carbon on the CO<sub>2</sub> adsorption capacity. *Mater Res Bull* 2016; 73: 130–139.



## Kil Blok Tuğlalı Bir Yığma Binanın Duvar Kesme Dayanımının N-Schmidt Çekici ile Belirlenmesi

Orhan DOĞAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, Türkiye

\*<sup>1</sup> odogan67@hotmail.com

(Geliş/Received: 21/08/2020;

Kabul/Accepted: 23/11/2020)

**Öz:** 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'ne göre Türkiye'deki mevcut yapı stokunun tamamı deprem kuşağında yer almakta olup, yaklaşık %50'sinin yığma bina olduğu ve bunların genelde kırsal alanlarda olduğu bilinmektedir. Kentlerdeki mevcut yığma binalar çoğunlukla mühendislik hizmeti görmüşse de tam tersine kırsal alandaki binaların çoğu mühendislik hizmeti görmemiştir. Genel olarak deprem riski içeren bu binaların güçlendirilmesi 6306 sayılı Kentsel Dönüşüm Kanunu ile zorunlu hale getirilmiştir.

Yığma bir binanın deprem riskinin belirlenebilmesi için gerekli olan duvarların kesme dayanımı, örgü tuğlasının boşluk oranına bağlı olarak TDY-2007'inde doğrudan verilirken, TBDY-2018'de örgü harcının basınç dayanımına bağlı olarak verilmektedir. Bu değerlerin mevcut hasarlı test yöntemlerle belirlenmesi taşıyıcı sisteme oldukça büyük tahribatlara neden olmasının yanı sıra, bina sakinlerine oldukça büyük rahatsızlık vermektedir.

Bu çalışma ile hasarlı yöntemle ortaya çıkan tüm bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve duvarın kesme dayanımını belirlemek için yerinde daha hızlı, pratik ve hasarsız bir test yöntemi geliştirmek amaçlanmıştır. Bu amaçla, mevcut harman tuğlalı yığma bir binanın dört farklı katında ASTM C 1531-03 benzeri bir yöntemle duvarın kesme dayanımı belirlenmiş ve ayrıca örgü ve sıva harcının N-Schmidt çekiciyle R okumaları alınmıştır. Hesaplanan eksenel gerilme değerleri ve örgü-sıva harçlarının R değerleriyle, duvarın bulunan kesme dayanımları arasında uyumlu bir denklem ortaya konmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Yığma Bina, Duvar Kesme Dayanımı, Örgü ve Sıva Harcı, Yığma Binalarda Risk Analizi, Harman Tuğlası

## Determination Of Sliding Shear Strength Of A Clay Block Brick Masonry Building Using N-Schmidt Hammer

**Abstract:** 2018 According to Turkey Building Earthquake Code (TBDY-2018), it is known that on all of the existing building stock in Turkey is located in the earthquake zone and it is known that about 50% of them are masonry buildings and these generally take place in rural areas. Although the existing masonry buildings in cities have mostly received engineering services, on the contrary, those in rural areas have not received engineering services. Strengthening these buildings, which generally include earthquake risk, has been made compulsory by the Urban Transformation Law No. 6306.

Sliding shear strength in the existing masonry building which is required to determine the earthquake risk of a masonry building is given directly in the TDY-2007 regulation depending on the brick hollow ratio, while in TBDY-2018 it is given based on the characteristic compressive strength of the mortar. Determination of these values with existing damaged test methods, besides causing considerable destructions to the structural system, causes considerable discomfort to the residents.

With this study, it is aimed to develop a faster, practical and undamaged test method in place to determine the sliding shear strength of the Wall, eliminating all these negativities arising with the damaged method. For this purpose, the sliding shear strength of the wall was determined with a method similar to ASTM C 1531-03 on four different floors of an existing clay brick masonry building, and also R readings of the plaster and mortar were taken with the N-Schmidt hammer. A compliant equation has been put forward between the sliding shear strengths of the wall and the calculated axial stress values and the R values of the mortar and plaster.

**Key words:** Masonry Building, Sliding Shear Strength, Mortar and Plaster, Risk Analysis in Masonry, Clay Brick

### 1. Giriş

Yığma bina, yapay-doğal blok malzemenin bağlayıcıyla birbirine tutturulması ile oluşan bir yapı türüdür. Genellikle ekstra işçilik gerektirmediğinden, malzeme bakımından kolay ulaşılabilir olmasından, yerel ve doğal

\* Sorumlu yazar: [odogan67@hotmail.com](mailto:odogan67@hotmail.com) Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000 0002 4942 1725

malzemelerden üretilmesinden dolayı ekonomik olması gibi avantajlardan dolayı geçmişte çok tercih edilmiş ve günümüzde kırsal bölgelerde tercih edilmektedirler [1]. Ancak taşıyıcısı duvarlar olan bu yapı rijit özellik gösterdiğinden dolayı deprem esnasında yüksek kesme kuvvetine maruz kalmaktadır. Geleneksel yöntemlerle yapılan bu binalarda; blok malzeme, örgü ve sıva harcına göre daha yüksek dayanıma sahip olduğundan, harç malzemesinin mekanik özellikleri duvarın göçme şeklini ve taşıma kapasitesini belirleyen en önemli parametredir [2,3].

Duvarda bağlayıcı olarak kullanılan harç malzemesi su, çimento, kireç ve kum malzemelerinin karışımıyla oluşmaktadır. Geçmişten günümüze kadar incelendiğinden, çimento malzemesinin üretimi ve ulaşılabilirliği arttıkça örgü harcındaki kullanım oranının arttığı gözlemlenmektedir. Ancak harçtaki çimento oranı mekanik özelliklerin belirlenmesinde büyük önem arz ederken, farklı karışım oranları, kullanılan kumun şekli, granülometrisi ve kirlilik oranı, hava koşulları gibi parametreler dayanımı etkilemektedir [4-6]. Tüm bu değişkenlerden dolayı farklı mekanik özellikler gösteren örgü harcı çeşitliliği oluşmakta ve hatta uygulama faktörü ve ortam koşulları göz önüne alındığında aynı bina içerisinde farklı katlar arasında dahi örgü harcı mekanik özellikleri değişkenlik göstermektedir [7].

Deprem kuvveti altında, zemin tarafından yanal ötelenmesi engellenmeyen veya rijitliği diğer katlardan çok küçük olan, diğer katlara göre maksimum kesme kuvvetinin etkisinde olan en alt kat, kritik kat olarak tanımlanmaktadır [8]. Kargir malzemelerin kalite farklılıklarından dolayı, farklı mekanik özelliklere sahip olması; dayanımı düşük duvarların devrilme veya göçme riskini artırmaktadır [9]. Duvar dayanımını etkileyen örgü harcının katlar arasında farklılık oluşturması durumunda düşük dayanımlı örgü harcı kritik kat belirlemede önemli rol oynamaktadır.

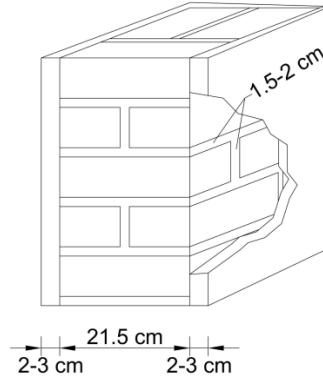
Meydana gelen ve yıkıcı etkisi olan birçok deprem sonrası yığma binalar üzerine yapılmış çok sayıda çalışma söz konusudur [10-12]. Deprem sonrası gözlenen yapısal davranış ve oluşan hasarlara ilişkin lokal saha çalışma verileri, hasar tespitine esas olan birçok parametre ve öneriler literatür çalışmalarında yer almaktadır [13,14]. Günümüzde yığma bir binanın yanal kuvvetlere karşı deprem performansı sadece duvarlarının deneysel verilerine dayanmayan, tuğla cinsine ve örgü harcı dayanımına göre şartnamelerde önerilen kesme performansına bağlı olarak değerlendirilmektedir [15,16]. Yığma binada yanal kuvvetlere karşı koymasını sağlayan kesme dayanımı, tuğla ile örgü harcı arasındaki aderansla oluşan bağ kuvveti ve bu bağın kopması sonrasında ise oluşan kalıcı sürtünme kuvvetidir [17]. Dolayısıyla mevcut binaların deprem performansının belirlenmesinde, en zayıf halka olan örgü harcı ile tuğla arasındaki kesme mukavemetinin belirlenmesinde, ASTM C 1531-03 ve core deneyi gibi deneysel model ve yöntemlerin kullanılmaktadır [18-20]. Ancak, örgü harcı ile tuğla arasındaki kesme mukavemetini belirlemek için önerilen bu deneysel yöntemler tahribatlı yöntemler olup, zaman ve maliyet bakımından uygulanabilirliği sınırlıdır [21].

Yığma bir binanın deprem performansı analizinde kullanılmak üzere TBDY 2018'e göre örgü harcı basınç dayanımına bağlı olarak kesme mukavemetinin tayini ya da hasarlı deney yöntemlerinden birinin yapılması gerekmektedir. Halihazırda kullanılmakta olan yığma binaların üzerinde tahribatlı deney yöntemlerinin kullanılması bina sakinlerini rahatsız etmektedir. Bu deneysel çalışma ile hasarlı yöntemle ortaya çıkan olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve duvarın kesme dayanımını belirlemek için yerinde daha hızlı, pratik ve hasarsız bir alternatif test yöntemi geliştirilerek literatüre katkı sağlayacaktır. Mevcut bir yığma bina üzerinde binanın dört farklı lokasyonundan ASTM C 1531-03 benzeri tahribatlı deney yöntemiyle kesme gerilmelerinin bulunması ve tahribatsız deney yöntemlerinden N-Schmidt çekici ile duvarların örgü harcı ve sıva harcının R okuma değerlerine ve bina ölü yüküne dayalı olarak duvar kesme dayanımının hızlı şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda tahribatlı deney yöntemiyle tahribatsız deneyler ve değişkenler arasında uyumlu bir bağlantı ortaya konmuştur [20-22].

## 2. Malzeme ve Yöntem

### 2.1. Yapısal Özellikler

Mevcut bir yığma bina üzerinde kesme gerilmesinin hasarsız yöntemler kullanılarak hızlı belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmanın yapıldığı bina 1950 yılında Ankara'nın Çankaya ilçesinde, yaklaşık olarak 19.50x11.00 m taban oturan alanında ve 5 katlı olarak inşa edilmiştir. Binanın yapımında katlarda 215x102x65 mm boyutunda dolu harman tuğlası kullanılırken, binanın en üst katında dolu tuğla ile aynı ebatlara sahip boşluk oranı %35'ten az düşey delikli harman tuğlası kullanılmıştır. Sıva dahil duvar kalınlığı yaklaşık 27 cm olup, tuğlaları birbirine bağlayan derz örgü harcı kalınlığı 1,5-2 cm ve duvar örtüsü sıva harcı kalınlığı 2-3 cm arasında değişkenlik göstermiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Duvar kesit görünümü

## 2.2 Deneysel Yöntem

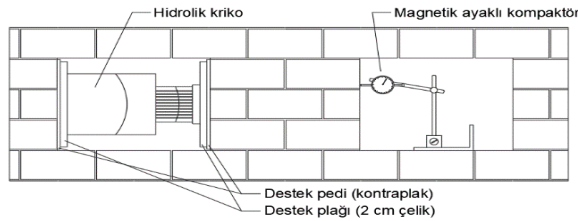
Mevcut bir yığma bina üzerinde farklı katlarda oluşan kesme gerilmesinin tespiti için tahribatlı deneyler, kesme gerilmesinin tahmini içinse aksel gerilme hesaplanarak tahribatsız deneyler yapılmıştır.

### 2.2.1. Aksel Gerilme Hesabı ve Tahribatsız Deney

Kesme gerilmesinin değişkenlik göstermesinde, örgü harcı ve tuğla arasındaki bağlanma kalitesinin yanı sıra aksel gerilmeler önemli faktör olarak etki etmektedir. Farklı katlarda yapılan deneylerden dolayı aksel gerilmelerde katlara göre değişkenlik arz etmekte olup, katlardaki aksel gerilmeler kat ağırlıkları bulunarak hesaplanmıştır. Ayrıca aksel gerilmelerin doğruluğunun kontrolü için StatiCad modelleme ve analiz programıyla çözümlenmiştir.

Bina inşası sırasında kullanılan yapı malzemelerinin farklı ocaklardan temin edilmiş olabileceği gibi, yapım esnasında uygulama faktörü dikkate alınarak, tuğlaların hem sınıf olarak hem de mekanik özellikleri bakımından değişkenlik gösterebileceği düşüncesi ile tahribatsız deney yöntemlerinden biri olan N-Schmidt test çekici ile (R) geri sekme okumaları yapılmıştır. Tuğla, sıva harcı ve örgü harcı için ayrı ayrı 12'şer adet olmak üzere N-Schmidt çekici ile okumalar alınmış, bu okumalardan maksimum ve minimum R değerleri hesaba katılmadan kalan diğer 10 R değerinin ortalaması hesaplanmıştır [22].

Şekil 2. Tuğla duvar itme-kesme deney düzeneği



### 2.2.2. Tahribatlı Deney

Bu çalışmada kesme dört farklı kattaki kesme gerilmelerinin bulunması için tahribatlı deney düzeneğiyle her kat için bir test yapılmıştır. Tahribatlı deney olarak Şekil 2'de gösterildiği gibi, ASTM C 1531-03 standardı Metot-B deney düzeneğine benzer test düzeneği kullanılmıştır [20]. Standart deney düzeneğinden farklı olarak, standartta kullanılan tek tuğla yerine üst üste 3 tuğla birlikte itilmiş ve tek tuğlaya oranla numune hazırlama hatalarını minimize edebilmek için sürtünme yüzeyi daha büyütülerek, sıralı 2 boy tuğlayı itmek üzere bir deney düzeneği tasarlanmıştır.



### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1 Tahribatsız Deney Sonuçları

Tuğla, örgü harcı ve sıva harcı üzerinde yapılan tahribatsız deney okumalarına dair veriler Tablo 1 yer almaktadır. Katlar esas alınarak  $R_{ort}$  değerleri incelendiğinde;  $R_{tuğla}$  değerinin 26.50-49.75 aralığında,  $R_{sıva}$  harcı değerinin 12.50-19.50 aralığında,  $R_{örgü}$  harcı değerinin 11.00-16.00 aralığında olduğu görülmektedir. Sıva ve örgü harcı R değerlerinin genel ortalamasının tuğla R değerlerinin genel ortalamasına oranlandığında %50'sinden daha az olduğu, yer yer 1/3'ünden dahi küçük değerlerde kaydedildiği görülmektedir (Tablo 1).

**Tablo 1.** N-Schmidt Test Çekici R okuma değerleri.

	$R_{tuğla}$	$R_{sıva}$ harcı	$R_{örgü}$ harcı
2. Kat	26.50	19.50	12.00
3. Kat	32.50	15.25	11.00
4. Kat	28.50	15.00	16.00
5. Kat	49.75	12.50	12.00
$R_{ort}$	<b>34.31</b>	<b>15.57</b>	<b>13.25</b>

Deneysel esnasında tuğlalarda herhangi bir kesme göçmesinin gözlenmemiş olması ve R değerlerine bakıldığında, duvarın kesme performansındaki etken parametrenin, en düşük mukavemeti ile birinci dereceden örgü ve sıva harcının olacağı görülmüştür.

Hasarsız deney yöntemi olan test çekici betonarme elemanlarda beton yüzeyinde karbonlaşma ile ortaya çıkan dayanım artışına ve iri agregalara rastlamasına bağlı olarak daha yüksek sonuçlar vermesi nedeniyle, etriye içerisinde kalan çekirdek bölgesinin dayanımını vermediği için kullanılması uygun görülmemektedir. Ancak sıva 2-3 cm kalınlığında ve  $D_{max}=1-3$  mm'lik yüzeyel bir kaplama malzemesi olduğundan, 2-3 cm ile sınırlı olan karbonatlaşmadan sıva %100 etkilenmeyeceğinden hasarsız deney yöntemi olan test çekici sağlıklı sonuçlar verdiği, örgü harcı ise iç ve dış sıvalar arasında kaldığı için karbonatlaşmadan etkilenmeyeceğinden çekiç okumaları örgü harcının tüm özelliğini yansıttığı kabul edilmiştir.

#### 3.2. Eksenel Gerilme ( $\sigma$ ) ve Kesme Gerilmesi ( $\tau$ )

Mevcut bir yığma bina üzerinde kesme gerilmesinin hasarsız yöntemler kullanılarak hızlı belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmada, ASTM C 1531-03 deneysel yöntemine benzer bir yöntemle kesme gerilmesi belirlenmiş olup, yığma binanın kat adedi ve deneyin yapıldığı kata göre numune üzerine gelen eksenel düşey gerilmelerine, tuğla, sıva ve örgü harcının dayanımına ilişkin N-Schmidt çekici (R) okumalarına bağlı olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda elde edilen maksimum kesme gerilmesinin ve eksenel gerilmenin hesaplanması Doğan ve Odacıoğlu (2019) çalışmasına benzer şekilde yapılmıştır [7]. Alt katlara inildikçe duvar üzerine gelen düşey eksenel gerilmeler arttığından, katlara göre numune üzerine gelen eksenel düşey gerilmeleri bilgisayar modellemesi yapılarak bulunmuş ve ayrıca elle de hesaplanarak kontrolleri yapılmıştır. Hesaplanan düşey eksenel gerilmeler ( $\sigma_n$ ) ve shove deneyi sonucunda elde edilen yatay kesme gerilmeleri ( $\tau_u$ ) her kat için Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Katlara göre numunelere etkiyen düşey eksenel ( $\sigma_n$ ) ve yatay kesme ( $\tau_u$ ) gerilmeleri.

	$\sigma_n$ (MPa)	$\tau_u$ (MPa)
2. Kat	0.44	0.66
3. Kat	0.32	0.61
4. Kat	0.20	0.76
5. Kat	0.09	0.52

Üst katlara çıkıldıkça azalan düşey eksenel gerilme ( $\sigma_n$ )'ye bağlı olarak duvar kesme değerleri ( $\tau_u$ )'nin de azaldığı, duvarların kesme mukavemetinin, tuğlanın R değerlerindeki değişimlerden hemen hemen hiç etkilenmezken, sıvanın R değerinden çok az etkilendiği görülmüştür. Ancak örgü harcının R değerlerinin diğer

katlarda 11-12 iken 4. katta 16'ya çıkması ile duvarın kesme değerinin artarak büyük oranda etkilendiği tespit edilmiştir. Deney modelinin de bir sonucu olarak, beklendiği üzere, göçmenin yatay olarak, duvarın en zayıf halkası olan örgü harcı düzleminde meydana geldiği görülmüştür.

### 3.3 Regresyon Analizi

Örgü ve sıva harcının basınç dayanımının yani R değerlerinin tuğladan daha düşük olması nedeniyle, deney düzeneği de ona göre tasarlanmış ve duvar üzerine gelen yanal yükleri örgü ve sıva harcının birlikte karşılaması, yatay kesme göçmesinin de yatay düzleminde örgü harcı-tuğla birleşim noktaların da gerçekleşmesi sağlanmıştır. Duvar basınç mukavemetini gösteren ortalama ( $R_{ort}$ ) okumaları hesaplanırken, örgü ve sıva kalınlıkları oranında etki ettiği düşünülerek, Denklem 1 kullanılmıştır. Burada  $R_{ort}$  değeri binanın tüm katlarının R okumalarının ortalaması olarak hesaplanmıştır.

$$R_{ort} = R_{örgüharcı} \frac{t_{örgüharcı}}{t_{duvar}} + R_{sıva} \frac{t_{sıva harcı}}{t_{duvar}} \quad (1)$$

Binanın örgü ve sıva harcı R değerlerinin fazla değişken olmadığı kabul edilerek, binanın tamamı için bir  $R_{ort}$  hesaplanmıştır. Bu denklem kullanılarak binanın tamamı için kesme yüzeyindeki örgü harcı genişliği 1 tuğla boyu olup 21.50 cm ( $t_{örgü harcı}$ ) ve sıva harcı kalınlığı 2x2.50 cm alınarak ( $t_{sıva harcı}$ ),  $R_{ort}$  değeri hesaplanmış ve binanın genel ortalaması olarak da 13.68 olarak bulunmuştur.

$R_{ort}$  ile duvarın basınç mukavemeti ( $f_{ck}$ ) arasındaki bağıntı kullanılmış ve tuğla basınç dayanımının 36.43 MPa, örgü ve sıva harcı basınç dayanımının genel ortalaması yaklaşık 10.12 MPa olarak bulunmuş ve her kat için  $R_{ort}$  ve duvarların  $f_{ck}$  değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bulunan dayanımlar zaman faktörü 0.70 katsayısı da dikkate alındığında tuğlanın dayanımının yaklaşık 25 MPa, harç dayanımının ise yaklaşık 7 MPa dolaylarında olduğu görülmüştür [23].

**Tablo 3.** Katlara göre  $R_{ort}$  ve duvarların  $f_{ck}$  değerleri.

	$R_{sıva harcı}$	$R_{örgü harcı}$	$R_{ort}$	$f_{ck}(MPa)$
2. Kat	19.50	12.00	13.39	9.98
3. Kat	15.25	11.00	11.79	9.36
4. Kat	15.00	16.00	15.81	11.30
5. Kat	12.50	12.00	12.09	9.47
	<b>15.57</b>	<b>13.25</b>	<b>13.68</b>	<b>10.12</b>

Bu veriler ışığında, yığma bina duvarlarının yatay kesme dayanımını etkileyen iki ana parametreden birincisinin binadan binaya değişken olan örgü ve sıva harcının  $R_{ort}$  değeri, ikincisinin ise katlar arasında ve duvardan duvara değişkenlik gösteren düşey eksenel gerilmelerin olduğu düşünülerek, bu iki bağımsız ana değişkene bağlı olarak, bağımlı değişken olan ve shove deneyleri ile elde edilen duvarların kesme dayanımı arasında var olan matematiksel eşitliği ve bu eşitliğin uyumlu olup olmadığı ölçütü olan iyi bir regresyonun olup olmadığı araştırılmış ve bu bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki matematiksel eşitlik Denklem 2'de verilmiştir. Shove deneyi sonucunda elde edilen duvar kesme dayanımı ile elde edilen matematiksel denklem arasındaki uyumluluğu gösteren  $R^2$  değerinin 0,936 olduğu görülmüştür.

$$\tau_u = 0.25 \sigma_n + 0.05 R_{ort} - 0.078 \quad (2)$$

Burada katlar arasında bağımsız değişkenlerin aşırı değişkenlik göstermesi durumunda, herhangi bir katının (özellikle en alt kritik katın)  $R_{ort}$  değeri ve üzerindeki düşey eksenel gerilme bu denklemde yerine konmak suretiyle o katın duvar kesme değeri bulunabileceği gibi, bağımsız değişkenlerin fazla değişkenlik göstermemesi durumunda binanın tüm katlarının  $R_{ort}$  değeri kullanılarak, incelenmek istenen katın düşey eksenel gerilmesi dikkate alınarak duvarın kesme dayanımı belirlenebilecektir. Bir duvarın kesme dayanımını, hasarsız yöntemlerden R okuma değerine bağlı olarak, %93,9 gibi iyi bir uyumla ortaya koyan bu denklemin, gerek riskli bina tespitinde, gerekse bina performans analizlerinde dikkate alınması daha doğru sonuçlara götürecektir.

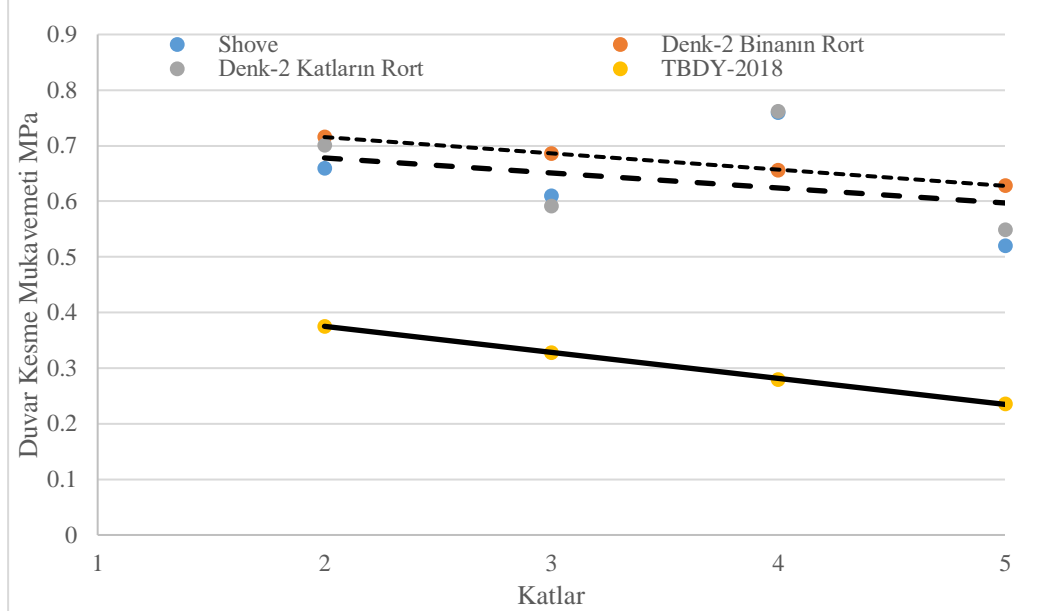
Denklem 3'te görüldüğü üzere, duvarın başlangıç kesme dayanımı olan  $\tau_0$  değeri, Riskli Bina Tespiti 2013 (RBTE-2013)'te sadece duvarın cinsi ve delik oranına bağlı olarak sabit değerler ile risk analizi hesaplarında alınması önerilirken, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018) ve Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar (RYTEİE 2019)'da sadece örgü harcının dayanımına bağlı olarak alınması önerilmektedir. Şartnameye göre örgü harcının basınç dayanımının yaklaşık 7 MPa değeri (M2-M9 kalitede) için  $\tau_0$  değeri 0.2 olarak verilmektedir [16, 24, 25].

$$\tau_u = \tau_0 + 0.4 \sigma_n \quad (3)$$

Her kat için duvar kesme dayanımına ilişkin; shove testi sonuçları, matematiksel Denklem 2 sonuçları ve şartname de verilen Denklem 3 sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. 4. kattaki duvarın kesme değerinin,  $R_{ort}$  değerine bağlı olarak, diğer katlara oranla daha yüksek çıkması göstermiştir ki; bir yığma bina için Denklem 2 kullanılarak, binanın genel  $R_{ort}$  değeri kullanılarak tek bir kesme dayanımı hesaplamak yerine, her katın ayrı ayrı  $R_{ort}$  değeri dikkate alınarak her katın duvarlarının kesme dayanımını hesaplamının daha güvenilir sonuçlar vereceği görülmüştür.

**Tablo 4.** Katlara göre numunelere etkileyen düşey eksenel ( $\sigma_n$ ) ve yatay kesme ( $\tau_u$ ) gerilmeleri.

Kat	$\sigma_n$	Shove Deneş Sonuçları $\tau_u$ (MPa)	Genel $R_{ort}$ için Denklem 2 $\tau_u$ (MPa)	Her Katın $R_{ort}$ için Denklem 2 $\tau_u$ (MPa)	TBDY-2018 $\tau_0=0.2$ $\tau_u$ (MPa)
2. Kat	0.44	0.66	0.72	0.70	0.38
3. Kat	0.32	0.61	0.69	0.59	0.33
4. Kat	0.20	0.76	0.66	0.76	0.28
5. Kat	0.09	0.52	0.63	0.55	0.24



**Şekil 3.** Katlara Göre Duvar Kesme Gerilmeleri.

Hem shove test sonucunda bulunan hem de matematiksel Denklem 2 ile hesaplanan duvarların kesme mukavemetinin, TBDY-2018'de verilen Denklem 3'e göre bulunan sonuçların üzerinde kaldığı görülmüştür. Şartnamelerde verilen duvar kesme mukavemetinin, katlar için elde edilen matematiksel denklem ile elde edilen bulgulara oranının %37-56 aralığında değiştiği, yani en güçlü 4. katı için güvenlik katsayısının 2.71, en zayıf olan 3. kat için ise güvenlik katsayısının 1.80 olduğu görülmüştür. Sonuç olarak şartnamelerimizde belirtilen yığma

duvarların kesme değerlerinin oldukça düşük hesaplandığı, diğer bir deyişle şartnamelerimizin oldukça güvenli tarafta kaldığı görülmüştür (Şekil 3).

Risk sınırına yakın yığma bir binanın deprem riski oranının yüksek olarak hesaplanması, güvenli tarafta kalmak adına doğru bir hesap gibi görülse de burada olduğu gibi yaklaşık iki katı ve hatta daha yüksek güvenilirlikle bir binanın da riskli çıkarılarak yıkılması da ekonomik bir tespit olmayacaktır.

#### 4. Sonuçlar

Ülkemizde farklı malzeme ve işçilikle yapılmış çimento katkılı örgü harçlı yığma binalarda, kesme mukavemeti binadan binaya çok büyük değişkenlikler arz etmektedir. Yığma bir binanın deprem performansı analizinde kullanılmak üzere TBDY 2018'e göre örgü harcı basınç dayanımına bağlı olarak kesme mukavemetinin tayini ya da hasarlı deney yöntemlerinden birinin yapılması gerekmektedir. Bu deneysel çalışma ile hasarlı yöntemle ortaya çıkan olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve duvarın kesme dayanımını belirlemek için yerinde daha hızlı, pratik ve hasarsız bir alternatif test yöntemi geliştirilmiştir.

20. YY. ikinci yarısında yapılmış olan 5 katlı mevcut bir yığma bina üzerinde kesme gerilmesinin hasarsız yöntemler kullanılarak hızlı belirlenmesine yönelik yapılan bu çalışmada:

- Tuğlalarda herhangi bir kesme göçmesinin gözlenmemiş olması ve R değerlerine bakıldığında, duvarın kesme performansındaki etken parametrenin, en düşük mukavemeti ile birinci dereceden örgü ve sıva harcının olacağı ve göçmenin duvarın en zayıf halkası olan örgü harcı düzleminde meydana geldiği görülmüş,
- Üst katlara çıkıldıkça azalan düşey eksenel gerilmeye bağlı olarak duvar kesme değerlerinin de azaldığı, duvarların kesme mukavemetinin, tuğlanın R değerlerindeki değişimlerden hemen hiç etkilenmediği, ancak örgü ve sıva harcının R değerlerinden büyük oranda etkilendiği görülmüş,
- ASTM C 1531-03 deneysel yöntemine benzer bir yöntemle duvarın kesme gerilmesi belirlenmiş, duvarların kesme dayanımını ile örgü ve sıva harcının  $R_{ort}$  değeri ve duvara gelen eksenel düşey gerilme arasında %93.9 gibi iyi bir uyumla uyumlu bir matematiksel denklem elde edilmiş,
- Hem shove test sonucunda bulunan hem de matematiksel Denklem 2 ile hesaplanan duvarların kesme mukavemetinin, TBDY-2018'de verilen Denklem 3'e göre bulunan sonuçların üzerinde kaldığı görülmüş ve şartnamelerde verilen duvar kesme mukavemetinin, katlar için elde edilen matematiksel denklemlerle elde edilen bulgulara oranının %50-73 aralığında değiştiği, yani en güçlü 4. katı için güvenlik katsayısının 2, en zayıf olan 3. katta ise güvenlik katsayısının 1.37 olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak şartnamelerimizde belirtilen yığma duvarların kesme değerlerinin oldukça düşük hesaplandığı, diğer bir deyişle şartnamelerimizin oldukça güvenli tarafta kaldığı tespit edilmiştir.

Risk sınırına yakın yığma bir binanın deprem riski oranının yüksek olarak hesaplanması, güvenli tarafta kalmak adına doğru bir hesap gibi görülse de burada olduğu gibi yaklaşık iki katı ve hatta daha yüksek güvenilirlikle bir binanın da riskli çıkarılarak yıkılması da ekonomik bir tespit olmayacaktır.

Bu bakımdan benzer çalışmaların farklı tuğla ve harçlarla inşa edilmiş farklı binalar üzerinde yapılması, mevcut bina risk analizlerine ilişkin elde edilen duvarlarının kesme mukavemetini veren bağıntının güvenilirliğini artıracak, böylece Türkiye özelinde yapılmış oldukça değişkenlik arz eden yığma binaların daha bilimsel risk analizlerinin yapılmasını mümkün kılacaktır.

#### Kaynaklar

- [1] Can Ö. Investigation of seismic performance of in-plane aligned masonry panels strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer. Construction and Building Materials, 2018, 186: 854-862.
- [2] Akgül M, Doğan O. Yığma yapılarda güçlendirme yöntemleri ve TBDY-2018'de yığma yapılar. Munzur 1. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi; 24-26 Mayıs 2019; Tunceli, Türkiye. 73-86.
- [3] Göker Ş, Karaşin A. Depremde hasar gören kırsal yapılar için bir yapısal hasar değerlendirmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi 2015; 6(1): 31-38.
- [4] Haach, V.G, Vasconcelos G, Lourenço P.B. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. Construction and Building Materials 2011; 25(6): 2980-2987.
- [5] Berhane Z. Evaporation of water from fresh mortar and concrete at different environmental conditions. Journal proceedings 1984; 81(6): 560-565.
- [6] Almusallam, A. A. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. Cement and Concrete composites 2001; 23(4-5): 353-361.

- [7] Doğan O, Odacıoğlu O.G. An Experimental Study To Determine Sliding Shear Strength And Internal Frictional Coefficient Of Clay Brick Wall In A Masonry Building. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi UMAGD 2019; 11(2): 670-676.
- [8] Akgül M, Doğan O. Altındağ/Ankara Özelinde Tipik Yığma Binaların Deprem Risklerinin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre İncelenmesi. NWSAENS 2020; 15(1):1-14.
- [9] Akgül M, Doğan O. 4 Nisan 2019 Elazığ-Sivrice Depreminin Yığma Yapılara Etkisinin Değerlendirilmesi. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi UMAGD2020; 12(1): 265-277.
- [10] Yön B, Onat O. 3 Aralık 2015 Bingöl-Kiğı depreminin Tunceli ilindeki yığma yapılara etkisinin değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi 2018; 9 (1): 375-385. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/dumf/issue/36316/412703>
- [11] Sayın E, Yön B, Calayır Y, Gör M. Construction failures of masonry and adobe buildings during the 2011 Van earthquakes in Turkey. Structural Engineering and Mechanics 2014; 51(3): 503-518.
- [12] Güney D, Aydın E, Ozturk B. The evaluation of damage mechanism of unreinforced masonry buildings after Van(2011) and Elazığ (2010) Earthquakes. 11th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2015);2015; Ghent, Belgium.
- [13] Jagadish K. S, Raghunath S, Nanjunda Rao K.S. Behaviour of masonry structures during the Bhuj earthquake of january 2001. Journal of Earth System Science 2003;112(3): 431-440.
- [14] Bayraktar A, Çoşkun N, Yalçın A. Performance of Masonry Stone Buildings during the March 25 and 28 2004 Aşkale (Erzurum) Earthquake in Turkey. Journal of performance of constructed facilities 2007; 21(6). doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(2007)21:6(432).
- [15] TDY 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007.
- [16] TBDY 2018. Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara :Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, 2018.
- [17] Bayülke N. Yığma Yapılar - Taş ve Tuğla. İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şube, Ankara, Türkiye, 2013.
- [18] Schuller M.P, Atkinson R.H, Noland J. L. Structural evaluation of historic masonry buildings. APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology 1995; 26(2/3):51-61.
- [19] Mazzotti C, Sassoni E, Pagliai G. Determination of shear strength of historic masonries by moderately destructive testing of masonry cores. Construction and Building Materials 2014; 54: 421-431.
- [20] ASTM C1531-03. Standard Test Method for In Situ Measurement of Masonry Joint Shear Strength Index. West Conshohocken, United States. ASTM International, 2003.
- [21] Aköz F. Yığma Kagır Yapılarda Hasar Tespiti. YDGA2005, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2005.
- [22] TS EN 12504-2. Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 2: Tahribatsız muayene - Geri sıçrama sayısının belirlenmesi. Ankara : Türk Standartları Enstitüsü, 2014.
- [23] Erdoğan Y.T. 2003. Beton, Metu Pres, Ankara.
- [24] RBTE-2013. Riskli Bina Tespit Esasları. Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanunun Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.
- [25] RYTEİE - 2019. Riskli Yapıların Tespit Edilmesine İlişkin Esaslar. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı.

## CuZn Elektrotundan Zn'nin Uzaklaştırılmasının Hidrojen Çıkış Davranışı Üzerine Etkisi

Serap TOPRAK DÖŞLÜ\*

Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Mardin Artuklu Üniversitesi, Mardin, Türkiye  
Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Mardin Artuklu Üniversitesi, Mardin, Türkiye  
seraptoprak@artuklu.edu.tr

(Geliş/Received: 21/08/2020;

Kabul/Accepted: 21/10/2020)

**Öz:** Hidrojen üretiminde, elektrokimyasal yolla suyun ayrıştırılmasında yüksek katalitik aktiviteye sahip ve kararlı elektrotların geliştirilmesi çok önemlidir. Burada, CuZn elektrotunun fabrikasyonunu yapmak için ucuz alkali uzaklaştırma yöntemi kullanılmış ve bu yöntem elektrotta, hidrojen oluşum reaksiyonu (HER) için yüksek yüzey alanı ve verimli aktif merkezler sağlamıştır. CuZn elektrotu karakterize etmek için, taramalı elektron mikroskop (SEM), enerji dağılımlı X-Işını (EDX), atomik kuvvet mikroskop (AFM) ve Dönüşümlü voltametri (CV) tekniklerinden yararlanılmıştır. CuZn elektrotunun hidrojen oluşum karakteristiği 1,0 M KOH çözeltisinde, bakır kaplı bakır elektrot (Cu/Cu) ile kıyaslanmıştır. SEM analizlerine göre, Cu/Cu elektrotta bakır nano-tanecikler yüzeye dağılırken, CuZn elektrotta karnabahara benzeyen şekiller elde edilmiştir. Metallerin karakteristik pikleri CV ve EDX spektrumlarında ortaya çıkmıştır. HER etkinlikleri değerlendirildiğinde, CuZn elektrot (0.309 mA cm<sup>-2</sup>), Cu/Cu elektrot (0.043 mA cm<sup>-2</sup>) ile kıyaslandığında yüksek yük değişimi akım yoğunluğu elde edilmiştir. Ayrıca, CuZn elektrot, 50 mA cm<sup>-2</sup> akım yoğunluğunda daha düşük aşırı gerilime ve daha düşük Tafel eğimine sahiptir. Bu CuZn elektrotun Cu/Cu elektrotundan daha yüksek HER performansına sahip olduğu anlamına gelir. Bu yüksek katalitik aktivite, alkali uzaklaştırma nedeniyle yüksek yüzey alanı ve Zn ve Cu metallerinin sinerjistik etkisi ile açıklanabilir. Bu deneylere ek olarak, CuZn elektrot bazik ortamda 18000 saniye boyunca oldukça yüksek kararlılık ve dayanıklılık göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hidrojen oluşum reaksiyonu, CuZn elektrot, Elektrokatalizör, Alkali uzaklaştırma.

### The Effect of Leaching of Zn from CuZn on Hydrogen Evolution Behavior

**Abstract:** It is very important the development of electrodes with high catalytic activity and stable in the hydrogen production via electrochemical water splitting. Herein, facile alkaline leaching procedure is used to fabricate CuZn electrode and this procedure provides to electrode high surface area and sufficient active centers for hydrogen evolution reaction (HER). Scanning electron microscopy (SEM), Energy Dispersive X-Ray (EDX), atomic force microscopy (AFM) and Cyclic voltammetry (CV) are utilized to characterize leached electrode (CuZn). Hydrogen evolution characteristic of CuZn is compared to copper coated copper (Cu/Cu) electrode in 1.0 M KOH solution. While copper nano-particles are distributed over the copper surface for Cu/Cu, cauliflowers like shapes are obtained for CuZn, according to SEM analysis. Characteristic peaks of metals are appeared in the CV and EDX spectrums. In the evaluation of the HER activity, high exchange current density is obtained at CuZn electrode (0.309 mA cm<sup>-2</sup>) in comparison of Cu/Cu (0.043 mA cm<sup>-2</sup>). Moreover, CuZn electrode has smaller Tafel slope and overpotential at 50 mA cm<sup>-2</sup>, indicating that CuZn electrode is higher HER performance than Cu/Cu. This high catalytic activity can be expressed with increasing high surface area due to leaching procedure and synergistic effect of Zn and Cu metals. In addition to these experiments, CuZn electrode shows very high stable and durable structure over 18 000 s in basic media.

**Key words:** Hydrogen evolution reaction, CuZn electrode, Electrocatalyst, Alkaline leaching.

#### 1. Giriş

Sanayi devriminden sonra, petrol, kömür ve doğal gaz gibi karbon kaynaklı fosil yakıtlar insan hayatının vazgeçilmez enerji kaynakları olmuşlardır. Dünya nüfusundaki artış ve endüstriyel gelişmeler ile birlikte Dünya iklim değişikliği, çevresel sorunlar ve enerji sıkıntısı gibi çok önemli krizlerle karşı karşıya kalmıştır. Amerika'daki Enerji Bilgi İdaresine göre toplam Dünya enerji tüketimi 2015 de 575 Btu(British Thermal Unit, İngiliz Isı Birimi)'dan, 2040 yılında %28,5 artışla 739 Btu'ya artacağını bildirmiştir. Azalan enerji kaynakları ve artan çevresel sorunlar insanlığı sürdürülebilir enerji kaynakların bulunmasına yöneltmiştir. Bunlar arasında hidrojen içerdiği yüksek enerji yoğunluğu (143 MJ/kg) ve temiz olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır[1].

Hidrojen günümüzde en çok fosil kaynaklı yakıtlardan üretilmekte ve bu durum enerji krizini çözmeye pek ideal bir yol değildir. Bu nedenle daha sürdürülebilir ve çevreci yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu özelliklere sahip yöntem ise suyun ayrıştırılması yöntemi olup bunlar içerisinde en ideali elektrolizdir. Su elektroliz edildiğinde katotta hidrojen oluşum reaksiyonu (HER), anotta ise oksijen oluşum reaksiyonu (OER) içeren yarı reaksiyonlar meydana gelir. Alkali ortamda suyun elektroliz edilebilmesi için teorik olarak 1,23 V'luk

\* Sorumlu yazar: [seraptoprak@artuklu.edu.tr](mailto:seraptoprak@artuklu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: 0000-0002-5455-8179

bir elektrik enerjisi uygulanmalıdır. Fakat sistemdeki diğer aşırı gerilimler (anodik aşırı gerilim, katodik aşırı gerilimi vs.) bu uygulanan enerji miktarını artırır[2]. Burada amaç sistemdeki aşırı gerilimleri düşürmektedir. Bunun için ise katotta kullanılan elektrokatalizörlerin yüksek etkinliğe ve kararlı yapıya sahip olması istenir. Bu sayede maliyetin düşmesi sağlanarak ekonomik yolla hidrojen üretimi gerçekleşir. Platin (Pt) genellikle suyun elektrolizinde kullanılan en etkin ve kararlı elektrokatalizördür. Fakat yüksek fiyatı ve doğada az bulunması onun ticari uygulamalarda kullanılmasını sınırlamaktadır [3,4]. Çözüm, düşük miktar içeren Pt elektrokatalizörlerin veya yüksek etkinliğe sahip Pt içermeyen elektrokatalizörlerin kullanılmasıdır. Demir (Fe), Kobalt (Co) ve Nikel (Ni) metalleri ucuz olmasına rağmen, düşük etkinliğe ve çözelti ortamında korozyona uğraması nedeniyle pek tercih edilmemektedir. Etkinliği ve korozyon direncini arttırmak için ikili alaşımlar yapılarak, bu sayede yüzey morfolojiler değiştirilmekte ve geniş yüzey alanlı elektrokatalizörler elde edilmektedir [5]. Bunlara örnek olarak NiCu[6], FeCo[7], NiCo[8], NiMo[9] elektrokatalizörleri verilebilir. Bu elektrokatalizörlerde aşırı gerilimler düşürülerek yüksek etkinlikler elde edilmiştir.

Elektrokimyasal HER için iyi bir katalizör, aşırı potansiyeli düşürmeli ve dolayısıyla elektrokimyasal prosesin verimliliğini arttırmalıdır. Aşırı potansiyeli ve onset potansiyeli düşük ve akım değeri yüksek katalizörler, yüksek HER aktivitesine sahiptir[10]. Bu durumda, HER aktivitesi için hazırlanan katalizörlerin aşırı potansiyeli ve akım yoğunlukları önem kazanmaktadır.

Aşırı gerilimin düşürülmesinde ve etkinliğin artırılmasında, elektrokatalizörün yüzey alanının genişletilmesi önemli rol oynar[4]. Bu amaçla bir kimyasal yöntem olan alkali ortamda aktif metali (Al, Zn) elektrokatalizörden uzaklaştırma yöntemi, ucuz ve kolay uygulanabilir. Örneğin Solmaz ve ark. (2016) yaptıkları çalışmada NiZn elektrokatalizörünü hazırladıktan sonra Zn'nin elektrokatalizörden uzaklaştırılmasını, 1 gün boyunca %30'luk NaOH çözeltisinde bekleterek yapmışlardır. Bu sayede elektrotun yüzey alanının arttığını belirtmişlerdir[11]. Başka bir çalışmada, Crnkovic ve ark. (2004), Ni-Fe-Mo-Zn elektrokatalizörünü hazırlayarak, elektrokatalizörün yüzey alanını arttırmak için 80 °C'de, 4 saat boyunca %28 lik KOH çözeltisinde bekletmişler ve daha geniş yüzey alanlı elektrokatalizör elde etmişlerdir[12].

Bu çalışmada Bakır (Cu) elektrot, ince bir Ni filmi ile kaplanmış daha sonra ikili CuZn ile yüzey modifiye edilmiştir. Hazırlanan elektrokatalizör, 1 gün boyunca %30 luk NaOH çözeltisinde bekletilerek aktif Zn'nin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Böylelikle elektrokatalizörün yüzey alanı genişletilmiştir. Elektrokatalizörün HER davranışı ise 1,0 M KOH çözeltisinde incelenmiştir. Kıyaslamak amacıyla bakır kaplı bakır (Cu/Cu) elektrotunda HER davranışı aynı ortamda incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

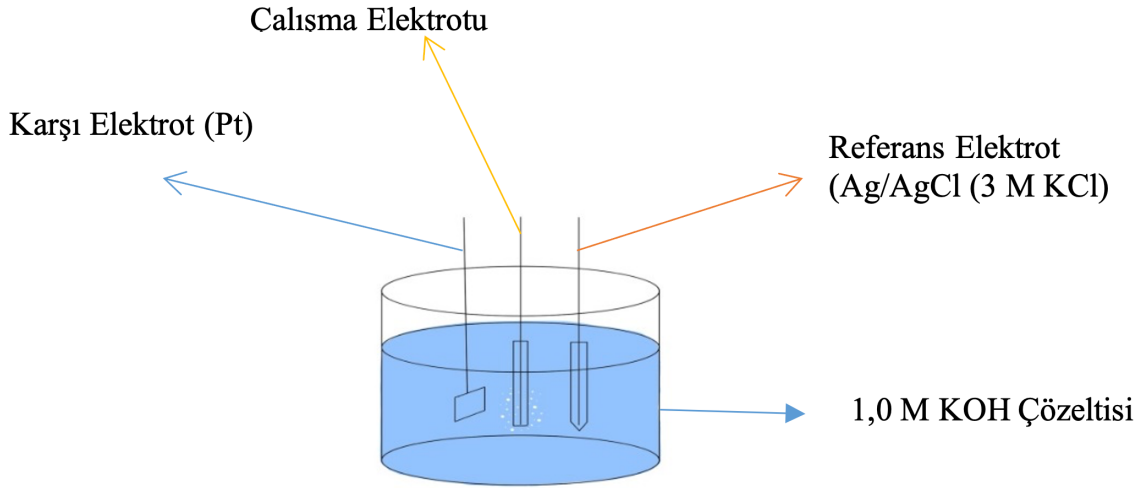
Çalışma elektrotlarında malzeme olarak bakır (Cu) elektrot kullanılmıştır. Cu elektrot şu şekilde hazırlanmıştır: Silindirik bakır çubuklar (6 mm çapında) 4 cm uzunluğunda kesilerek bir ucunda iletkenliği sağlamak üzere bakır tel ile tutturularak diğer ucu açıkta kalacak şekilde geri kalan kısım polyester ile tamamen kaplandıktan sonra açık kalan yüzeyin alanı 0,283 cm<sup>2</sup> olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan Cu elektrotlardan elektrokimyasal olarak Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn olmak üzere iki farklı yüzey elde edilmiştir.

İlki Cu banyosunda elektrokimyasal olarak oluşturulan Cu kaplı Cu (Cu/Cu) yüzeydir. Bu banyoda %26,67 CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O, %1,25 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> kullanılmıştır.

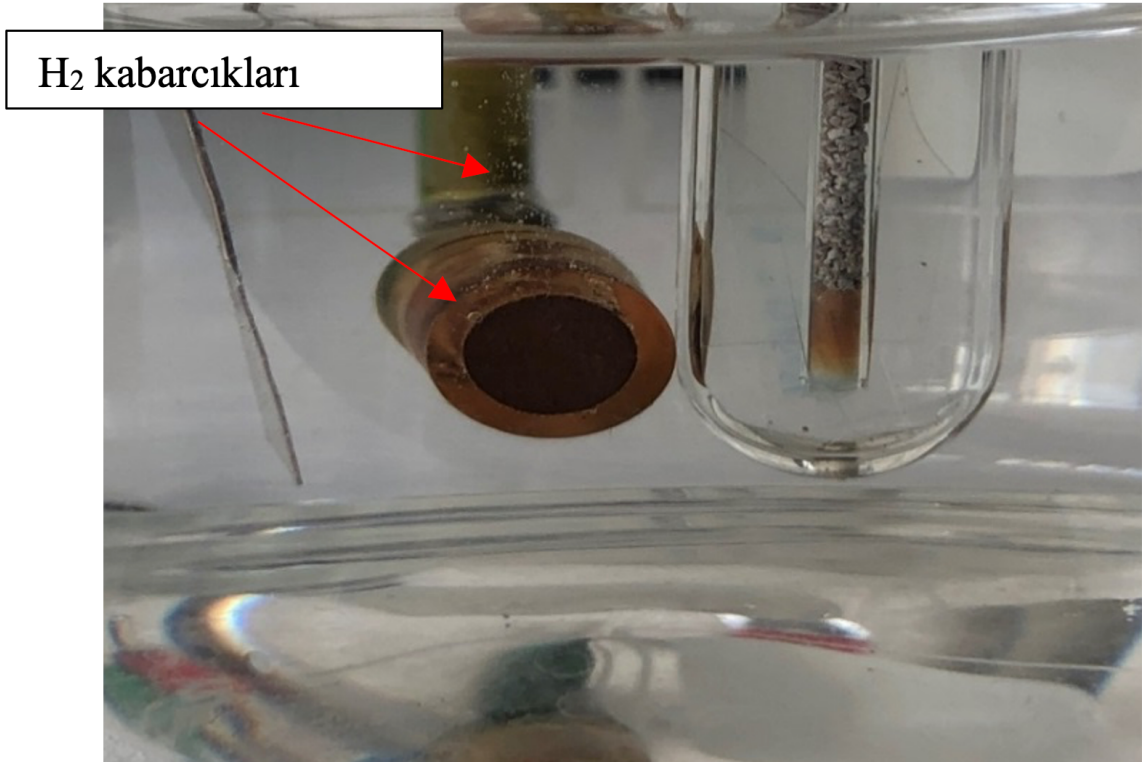
İkincisi ince bir Ni ile kaplanmış olan Cu üzerinde oluşturulan CuZn (Cu/Ni/CuZn) yüzeydir. Cu yüzeyinde elektrokimyasal olarak Ni kaplaması oluşturmak için Nikel banyosu kullanılmıştır. Bileşimi: %30,00 NiSO<sub>4</sub>.6H<sub>2</sub>O, %1,00 NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O, %1,25 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>. Ni yüzeyinde elektrokimyasal olarak CuZn oluşturmak için ise CuZn banyosunun bileşimi %1,78 CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O, %30,70 ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, %5,00 Na<sub>3</sub>C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>.2H<sub>2</sub>O, %1,25 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> şeklindedir.

Bakır elektrot yüzeyinde kaplamaların yapılmasında, elektrokimyasal ölçümlerde ve kararlılık ve dayanıklılık testlerinde geleneksel üç elektrotlu elektrokimyasal sistem kullanılmıştır (Şekil 1). Bu amaçla 2 cm<sup>2</sup> yüzey alanına sahip Pt tel karşıt elektrot, hazırlanan elektrotlar çalışma elektrodu olarak ve AgAgCl (3 M KCl) elektrot ise referans elektrot olarak kullanılmıştır. Bakır elektrot yüzeyinde kaplamaların yapılmasında ve elektrokimyasal ölçümlerde Ivium Vertex Potansiyostat & Galvanostat-V55600 ölçüm cihazı kullanılmıştır. Kararlılık ve dayanıklılık testlerinde ise Gamry Reference 3000 Potentiostat cihazı kullanılmıştır. Cu/Ni/CuZn elektrotun yüzey alanını genişletmek için, hazırlanan elektrotlar önce 4 saat 1,0 M NaOH çözeltisinde Zn yavaş bir şekilde uzaklaştırılması için bekletilmiş daha sonra 20 saat süresince %30 NaOH çözeltisine alınarak aktif çinko uzaklaştırılmıştır. Hazırlanan elektrotların HER davranışı 1,0 M KOH çözeltisinde incelenmiştir (Resim 1). CV eğrileri hidrojen ve oksijen çıkışının olduğu potansiyel aralığında 100 mVs<sup>-1</sup> tarama hızında elde edilmiştir. Yarı logaritmik katodik akım-potansiyel eğrileri -1,80 V ile sıfır akım potansiyel aralığında 5 mVs<sup>-1</sup> tarama hızında yapılmıştır. Kararlılık ve dayanıklılık testleri için kronoamperometri (CA) yöntemi ile CV teknikleri kullanılmıştır.

CA eğrisi  $-1,35\text{ V}$ 'ta 5 saat boyunca Cu/Ni/CuZn elektrotunda alınmıştır. CV deneyleri ise  $50\text{ mVs}^{-1}$  tarama hızında 300 döngü alınarak elde edilmiştir. Tüm deneylerde Nuve BS 30 marka su banyosu kullanılmış olup sıcaklık yaklaşık  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ayarlanmıştır. Elektrot yüzeyini karakterize etmek için taramalı elektron mikroskop (SEM) (FEI, QUANTA FEG 650), enerji dağılımlı X-Işını (EDX), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) (Park systems, NX 10), X-ışını kırınımı (XRD) ve dönüşümlü voltametri (CV) tekniklerinden yararlanılmıştır. Kullanılan tüm kimyasallar analitik saflıkta olup Merck firmasından temin edilmiştir. Her bir elektrokimyasal deneyler en az üç kez tekrarlanmıştır.



Şekil 1. Üç elektrotlu hücre.

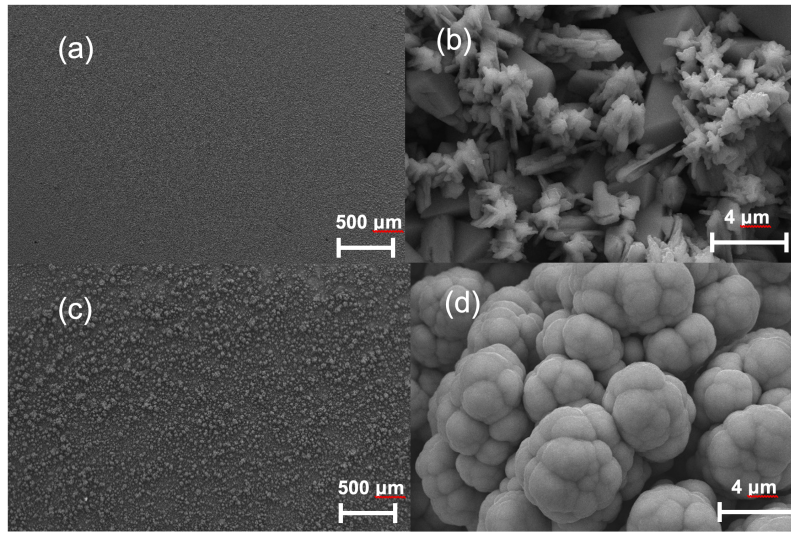


Resim 1. Cu/Ni/CuZn elektrotta  $1,0\text{ M KOH}$  çözeltisinde hidrojen gazının oluştuğunu gösteren fotoğraf.



### 3. Bulgular ve Tartışma

Cu elektrot yüzeyinde Cu ve CuZn tabakalarının oluşumu esnasında morfolojideki değişimleri araştırmak için SEM resimleri çekildi. Şekil 2, Cu ve CuZn yüzeylerinin SEM resimlerini göstermektedir. Şekil 2a ve b'de Cu/Cu elektrot yüzeyinin sırasıyla 60 kat ve 10 000 kat büyütülmüş resimleri yer almaktadır. Şekil 2c ve d'de ise Cu/Ni/CuZn elektrot yüzeyinin sırasıyla 60 kat ve 10 000 kat büyütülmüş resimleri yer almaktadır. Uzak mesafe (Şekil 2a ile c) ve yakın mesafe (Şekil 2b ile d) SEM görüntüleri karşılaştırıldığında iki yüzeyin birbirinden çok farklı olduğu açıkça görülmektedir. 60 kat büyütülmüş SEM resimlerinde CuZn'nun yüzeyinin, Cu yüzeyinden daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Cu yüzeyi oldukça pürüzsüz görülürken, CuZn yüzey girinti ve çıkıntılarla kaplıdır. 10 000 kat büyütülmüş SEM resimlerinde ise Cu yüzeyde kristalik tanecikler ile kaplı iken, CuZn yüzey (Şekil 2d) karnabahar görüntüsündedir [13,14]. Buda yüzey alanının arttığını ve aktif merkezlerin çoğaldığını göstermektedir. Görüldüğü gibi CuZn yüzeyinden Zn'nin uzaklaştırılması yüzey morfolojisini değiştirerek elektrotun yüzey alanının artmasına sebep olmaktadır.

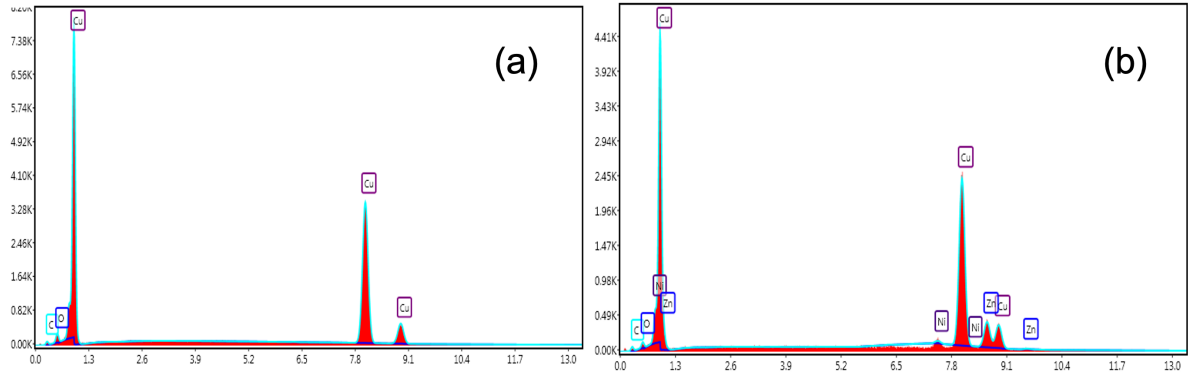


Şekil 2. Cu/Cu (a:60X, b: 10 000X) ve Cu/Ni/CuZn (c: 60X, d: 10 000X) elektrotların SEM görüntüsü.

Cu elektrot yüzeyindeki oluşturulan film bileşimleri EDX ile analiz edilmiş ve spektrumlar Şekil 3'de sunulmuştur. Bu filmlerdeki elementlerin bileşimleri ise yüzdelik olarak Tablo 1'de verildi. Spektrumlarda görüldüğü gibi bakır yüzeyinde oluşturulan filmlerdeki elementlerin karakteristik pikleri açıkça görülmektedir. Tablo 1 incelendiği zaman, Cu elektrot üzerinde %82,7 oranında Cu bulunan film oluştuğu görülmektedir. Ni/CuZn filminde %72,24 Cu, %0,67 Ni ve %13,51 Zn bulunmaktadır. Yüzeylerde ayrıca C ve O piklerinin de oluştuğu görülmektedir. EDX sonuçlarına göre, yüzeyde Cu ve CuZn kaplamalarının başarılı bir şekilde oluşturulduğu söylenebilir. Aynı zamanda, yüzeyde %13,51 gibi az bir oranda Zn bulunması, bazik ortamda Zn uzaklaştığında yüzeyde HER için geniş bir alanın oluşacağını işaretidir.

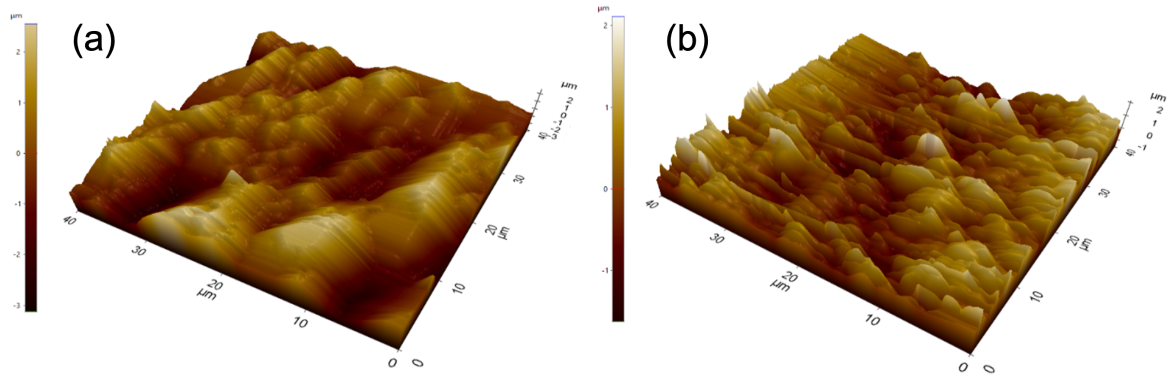
Tablo 1. Elektrotların EDX sonuçları

Elektrot	Atomik%				
	Cu	Ni	Zn	C	O
Cu/Cu	82.7	-	-	10.86	6.44
Cu/Ni/CuZn	72.24	0.67	13.51	10.57	3.02



Şekil 3. Cu/Cu (a) ve Cu/Ni/CuZn (b) elektrotların EDX spektrumları.

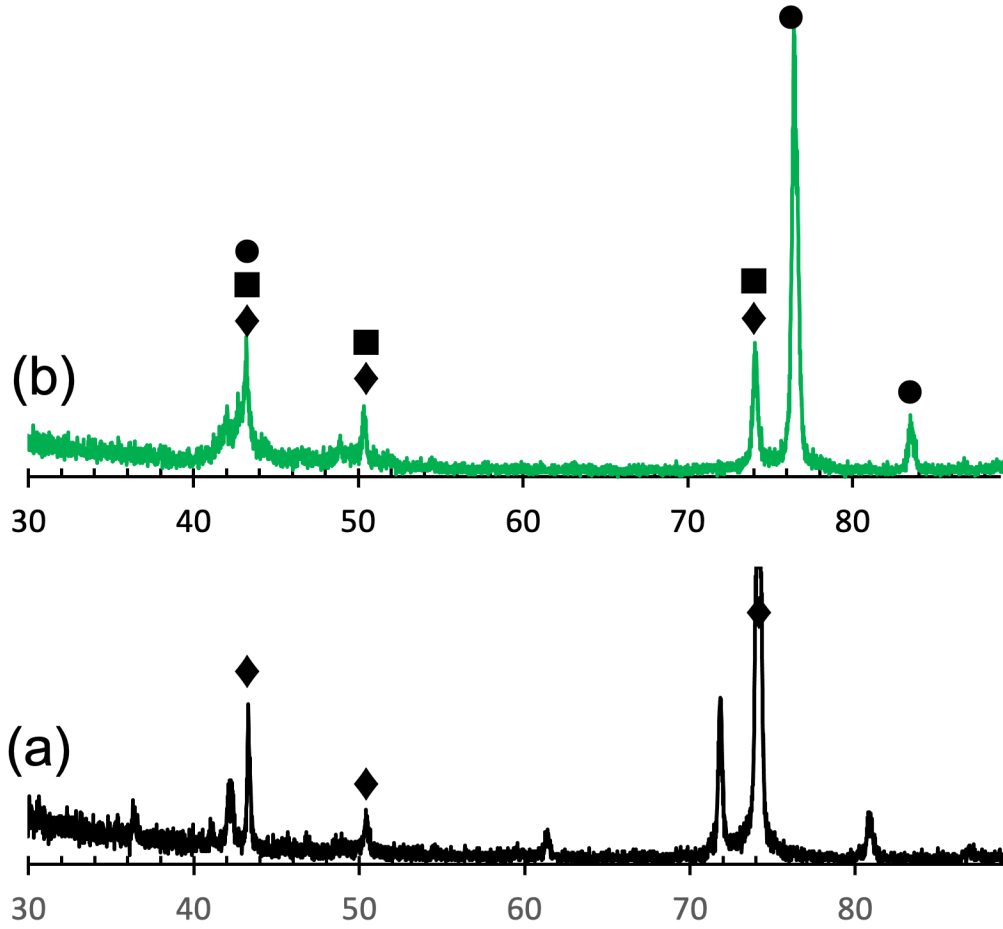
AFM elektrot yüzeyinin mikroyapısının karakterize edilmesinde önemli bir yöntemdir[15]. Dolayısıyla Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn elektrotların üç boyutlu (3D) AFM görüntüleri Şekil 4'te verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi Cu/Cu ile Cu/Ni/CuZn elektrotların 3D AFM görüntüleri birbirinden farklıdır. Cu/Cu elektrot yüzeyinde geniş tepeler oluşurken SEM görüntülerindeki kristal yapıya işaret edebilir. Cu/Ni/CuZn elektrot yüzeyinde ise küresel taneciklerin oluşturduğu girinti ve çıkıntılar görülmektedir. Bu küresel tanecikler yine SEM görüntülerinde de görülmektedir. Her iki yüzey oldukça pürüzlü olup, bu pürüzlü yapı HER aktiviteyi arttırabilir.



Şekil 4. Cu/Cu (a) ve Cu/Ni/CuZn (b) elektrotların üç boyutlu (3D) AFM görüntüleri.

Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn elektrotların kristal yapılarını açıklayabilmek için XRD analizleri yapılmış olup, ilgili spektrum Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5a'ya bakıldığında  $43,3^\circ$ ,  $50,4^\circ$  ve  $74,1^\circ$  de açığa çıkan pikler sırasıyla Cu(111), Cu(200) ve Cu(220) yüzey merkezli kübik (fcc) (Referans no: 98-005-3247) yapılarını işaret etmektedir. Şekil 5b incelediğinde ise yaklaşık  $43^\circ$ ,  $50^\circ$  ve  $74^\circ$  dolaylarında açığa çıkan pikler Ni metali için Ni(111), Ni(020) ve Ni(220) yüzey merkezli kübik (fcc) (Referans no: 96-901-3034) yapılarına karşılık gelmektedir. Cu metali için ise Cu/Cu elektrotuna karşılık gelen pikler ile hemen hemen aynıdır. Cu ve Ni metallerinin piklerine ek olarak  $43^\circ$ ,  $76^\circ$  ve  $83^\circ$  kırınım pikleri ise Zn(101), Zn(400) ve Zn(002) hekzagonal yapıya (hcp) (Referans no: 96-901-1600) işaret etmektedir. XRD ile elde edilen sonuçlar EDX sonuçlarını desteklemektedir.

Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn elektrotların karakterizasyonu SEM, EDX, AFM ve XRD ile yapıldıktan sonra ayrıca CV yöntemiyle de karakterizasyon yapılmıştır. Şekil 6a'daki Cu/Cu elektrotun CV eğrisi incelendiğinde tipik bakırın pikleri ortaya çıkmıştır. İleri yönlü taramada 3, geri yönlü taramada 3 olmak üzere toplam 6 pik ortaya çıkmıştır. Bu piklerden  $-0,414$  V'ta  $\text{Cu}/\text{Cu}^+$   $-0,066$  V'ta  $\text{Cu}/\text{Cu}^{++}$  ve  $0,604$  V'ta ise  $\text{Cu}^{++}/\text{Cu}^{+++}$  geçişlerdir[16-19]. Geri yönlü taramada ise  $0,519$  V'ta  $\text{Cu}^{+++}/\text{Cu}^{++}$ 'ye,  $-0,652$  V'ta  $\text{Cu}^{++}/\text{Cu}$ 'ya ve  $-1,01$  V'ta ki ise  $\text{Cu}^+/\text{Cu}$ 'ya geçiş piklerini ifade etmektedir[20-24]. Cu/Ni/CuZn elektrotun CV eğrisine bakıldığı zaman benzer piklerin oluştuğu söylenebilir. Fakat Zn'nin elektrottan uzaklaştırılmasıyla pikler genişleyerek akım değerlerinin artışına sebep olmuştur. Bakırın piklerine ek olarak çinkonun piklerinin de gözüktüğü söylenebilir.



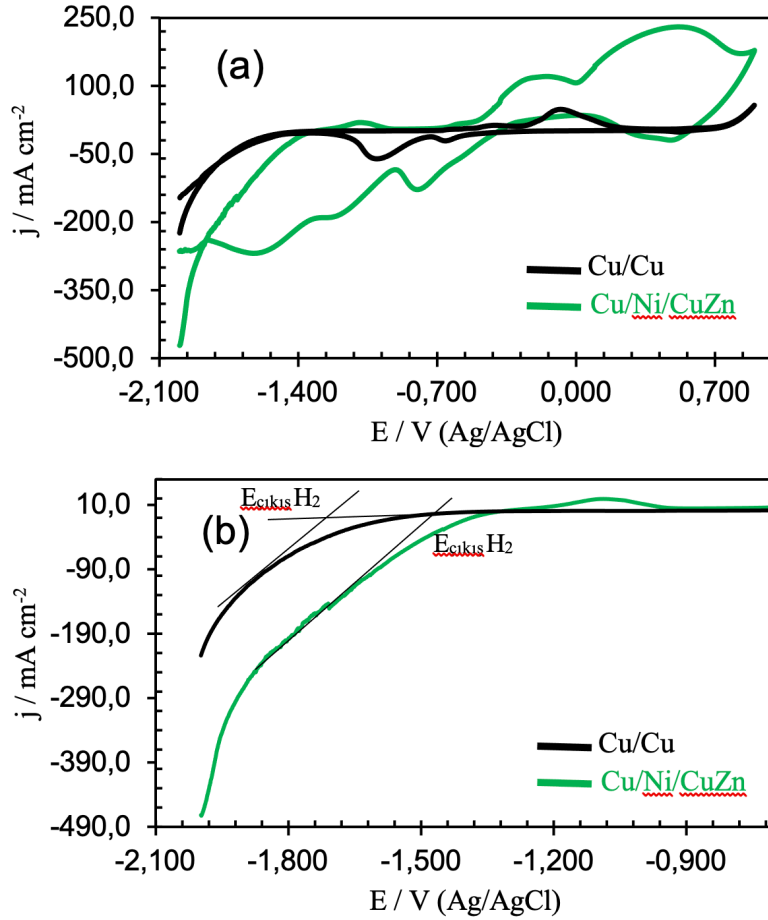
Şekil 5. (a) Cu/Cu ve (b) Cu/Ni/CuZn elektrotların X-ışını kırınım yöntemiyle elde edilen spektrumları (◆: Cu, ●: Zn, ■: Ni)

Şekil 6b'de her iki elektrot için hidrojen adsorpsiyon bölgesinin büyütülmüş hali görülmektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi Cu/Ni/CuZn elektrotun hidrojen çıkışının başladığı potansiyeli Tablo 2'de -1,434 V iken, Cu/Cu için bu değer -1,654 V'tur. Dolayısıyla Cu/Ni/CuZn elektrotunda daha düşük bir hidrojen aşırı gerilimi mevcuttur bu da, bu elektrotun katalitik etkinliğinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Aşağıda Cu/Cu için ileri ve geri yönlü taramada oluşan reaksiyonlar verilmiştir.



**Tablo 2.** Katodik akım-potansiyel ve CV eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

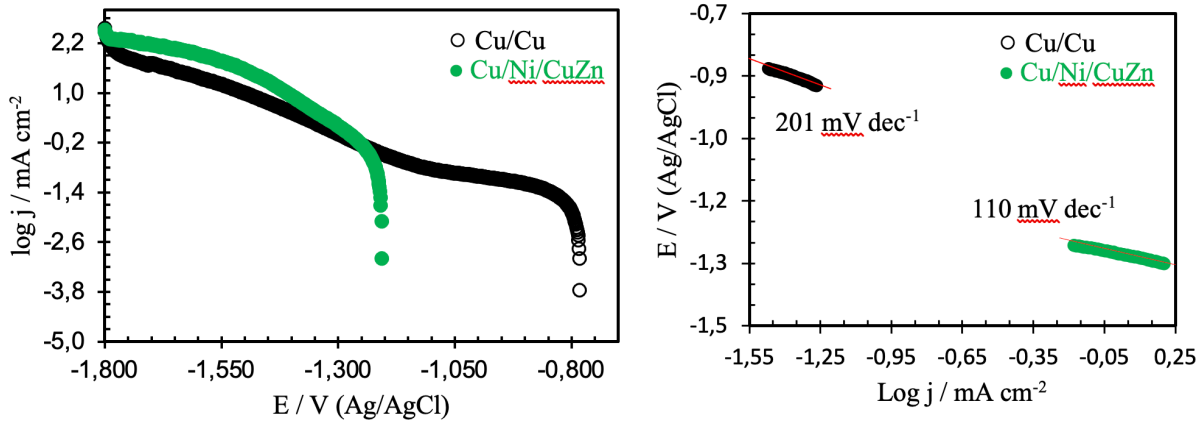
Elektrot	$-\eta_{50}$ V	$j_{-250}$ mA cm <sup>-2</sup>	$j_o$ mA cm <sup>-2</sup>	$-b_c$ mV dec <sup>-1</sup>	$E_{çıkışH_2}$ V
Cu/Cu	0,914	0,105	0,043	201	-1,654
Cu/Ni/CuZn	0,326	20,462	0,309	110	-1,434

**Şekil 6.** a: Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn elektrotların 1,0 M KOH çözeltisindeki dönüşümlü voltamogramları (Tarama hızı: 100 mV s<sup>-1</sup>). b: CV eğrilerinin hidrojen adsorpsiyon bölgesi.

Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn elektrotların HER performansını ölçmek için yarı logaritmik akım-potansiyel eğrileri alınmış ve Şekil 7a'da ve ayrıca her iki elektrot için Tafel eğrileri Şekil 7b'de verilmiştir. Şekil 7a'ya göre yük değişimi akım yoğunluğu ( $j_o$ ) Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle hesaplanmış ve Table 2'de verilmektedir. Bunun dışında Tablo 2'de  $j_{-250}$  -250 mV'taki akım yoğunluğu değerini ve  $-\eta_{50}$  ise 50 mA cm<sup>-2</sup> akım yoğunluğundaki aşırı gerilimi göstermektedir. Elektrotların Tafel eğimleri ise, Şekil 7b'deki Tafel eğrilerindeki doğrusal kısmın eğimi (Eşitlik 7) hesaplanarak bulunmuştur. Bu parametrelerden yola çıkarak hangi elektrotun HER yönünden daha etkin olduğuna karar verilebilir [25,26].

$$\eta = a + b \log j \quad (7)$$

Burada  $\eta$  aşırı gerilimi (V),  $b$  katodik Tafel eğimini ( $\text{mV dec}^{-1}$ ) ve  $j$  ( $\text{mA cm}^{-2}$ )'de akım yoğunluğunu göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi Cu/Ni/CuZn elektrotun katodik akım-potansiyel eğrisi Cu/Cu elektrotundan farklı bir yapı sergilemektedir. HER potansiyeli daha negatif değerlere kayarak aşırı gerilim düşmüş ve daha erken potansiyellerde hidrojen çıkışı olmuştur. Tablo 2'ye göre  $j_0$  kıyaslandığında yaklaşık on katlık bir artış ile  $0,043 \text{ mA cm}^{-2}$ 'den,  $0,309 \text{ mA cm}^{-2}$ 'ye,  $j_{-250}$  değeri ise oldukça yükselirken, aynı şekilde  $50 \text{ mA cm}^{-2}$  akım yoğunluğundaki aşırı gerilimi ( $-\eta_{50}$ ) ise oldukça düşmüştür. HER performansını ölçmek ve HER mekanizmasını belirlemek için Tafel eğimlerinin hesaplanması ve kıyaslanması gereklidir. Yüksek performanslı elektrotların Tafel eğimlerinin genelde düşük olması istenir[27]. Tablo 2'de görüldüğü gibi Cu/Ni/CuZn elektrotun Tafel eğimi  $110 \text{ mV dec}^{-1}$ , Cu/Cu elektrotunkisi ise  $201 \text{ mV dec}^{-1}$  olarak ölçülmüştür. Tafel eğiminin düşük olması Cu/Ni/CuZn elektrotun HER açısından daha etkin bir elektrot olduğunu göstermektedir. Cu/Ni/CuZn elektrotun Tafel eğimi  $120 \text{ mV dec}^{-1}$ 'e yakın olduğu için HER'un mekanizması Volmer basamağı üzerinden ilerlediğini gösterir. Ayrıca yukarıda hesaplanan diğer parametreler, Cu/Ni/CuZn elektrotunun suyun ayrıştırılmasıyla hidrojen üretimi esnasında oldukça etkili bir elektrokatalizör olduğunu kanıtlar. Cu/Ni/CuZn elektrotun yüksek katalitik etkinliği Cu ve Zn metallerinin sinerjistik etkileşimine, Zn'nin kaplamadan uzaklaştırılmasıyla artan yüzey alanına (SEM görüntülerine göre) ve alt tabakadaki Ni'nin katalitik etkisine bağlanabilir[28].



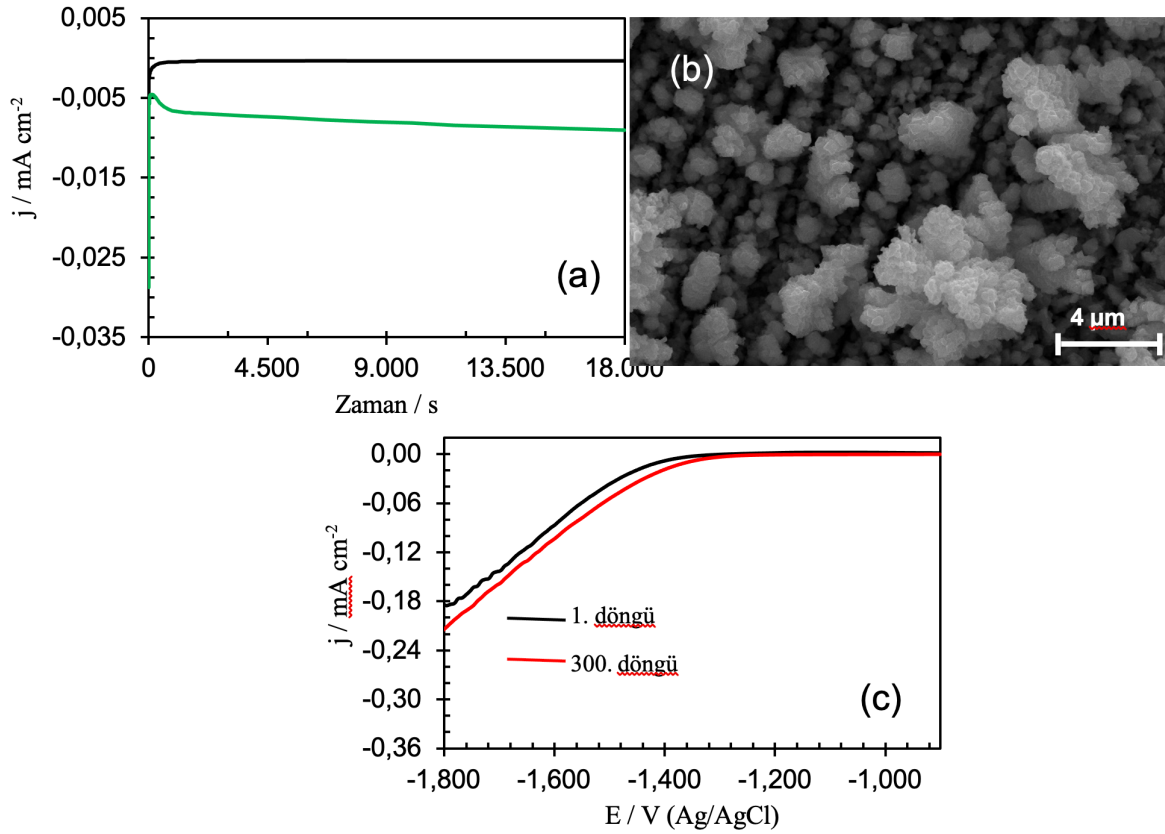
Şekil 7. Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn elektrotların 1,0 M KOH çözeltisindeki katodik akım-potansiyel eğrileri (a) ve Tafel eğrileri (b).

Cu/Ni/CuZn elektrotun HER etkinliğinin literatür ile kıyaslaması Tablo 3' de verilmiştir. Literatürde çoğunlukla Pt bazlı elektrotlara alternatif olarak Nikel bazlı elektrotlar gösterilir. Nikelin ikili ve üçlü diğer metaller ile kaplaması oluşturularak yapılan çalışmalar oldukça fazladır. Bu çalışmada hazırlanan Cu/Ni/CuZn elektrot Tabloda verilen bazı ikili Nikel içeren kaplamalar ile kıyaslaması yapılmıştır. Görüldüğü gibi bu çalışmada hazırlanan Cu/Ni/CuZn elektrot, diğer elektrotlardan daha etkindir. Bunun dışında, bilineceği gibi hazırlanan üçlü kaplamalar sahip olduğu geniş yüzey alanı nedeniyle çoğunlukla ikili kaplamalardan daha etkin çıkmaktadır. Cu/Ni/CuZn elektrotun HER etkinliği Tabloda verilen üçlü kaplamalar ile kıyaslandığında ise etkinliğin daha düşük olduğu söylenebilir.

Elektrotların katalitik etkinliğinin belirlenmesinin dışında, katalitik etkinliği yüksek olan elektrotun bazik ortamda pratik uygulamalar için dayanıklı ve kararlı olması da istenir. Bu amaçla genellikle kronoamperometri ve dönüşümlü voltametri yöntemleri kullanılır[38]. Katalitik etkinliği yüksek Cu/Ni/CuZn elektrotunda zamanla kararlılık ve dayanıklılık testi yapılmış ve ilgili şekiller Şekil 8'de verilmektedir. Şekil 8a'da Cu/Ni/CuZn elektrotun 5 saat boyunca 1,0 M KOH çözeltisindeki kronoamperometri eğrisi verilmektedir. Kıyaslamak için Cu/Cu elektrotunda eğrisi aynı ortamda alınmıştır. Cu/Ni/CuZn elektrotun katalitik etkinliği yüksek olduğu için akım değerleri diğer elektrottan daha yüksek değerlerdedir. Görüldüğü gibi eğri, başlangıç zamanında bir miktar düşmüş ve daha sonra kararlı hale gelmiştir. 5 saatin sonunda Cu/Ni/CuZn elektrotun yüzeydeki değişimini incelemek için SEM görüntüsü alınmış ve Şekil 8b'de verilmektedir. SEM görüntüsüne göre yüzey 5 saatin sonunda karnabahar yapıdan kristal yapıya dönmüş, yüzeyin gözenekli hali burada da görülmektedir. Kronoamperometriye ek olarak CV yöntemiyle elektrotta 300 döngü alınmış ve 1. ile 300. döngüler Şekil 8c'de verilmektedir. Şekil 8c'ye göre döngüler arasında ihmal edilebilir bir potansiyel kayma mevcuttur. Hem kronoamperometri hem de CV yöntemiyle alınan sonuçlara göre Cu/Ni/CuZn elektrot bazik ortamda zamanla kararlı ve dayanıklı bir yapı sergilemiştir. Bunun sebebi, CuZn kaplamasının Ni yüzeyindeki yapısına ve CuZn kaplaması ile Ni arasındaki güçlü etkileşimine dayanabilir[39].

**Tablo 3.** Cu/Ni/CuZn elektrotun elektrokatalitik etkinliğinin literatürle kıyaslanması.

Elektrot	$-\eta$ (mV)	$j_o$ (mA cm <sup>-2</sup> )	Çözelti	$-b_c$ (mV dec <sup>-1</sup> )	Ref
	205@10mA cm <sup>-2</sup>				
CuZn	326@50mA cm <sup>-2</sup> 482@135mA cm <sup>-2</sup>	0,309@25 °C	1 M KOH	110	Bu çalışma
Yığın NiCu	-	0,04	6 M KOH	149	[29]
NiCu	229@10mA cm <sup>-2</sup>	0,096	1 M KOH	116	[30]
NiCo	-	3,54x10 <sup>-4</sup>	1 M KOH	127	[31]
Ni-Co/NF	301@10mA cm <sup>-2</sup>	0,176	1 M KOH	169	[32]
NiMo	-	0,00239	1 M KOH	115	[33]
NiCo	-	0,0072	1 M KOH	125	[34]
ZnCoMo	-	0,0012@30 °C	6 M KOH	109	[35]
CoWZn	1,672@50mA cm <sup>-2</sup>	0,076	1 M KOH	135	[36]
NiFeZn	162@135mA cm <sup>-2</sup>	0,066	1 M NaOH	52	[37]



**Şekil 8.** a: Cu/Cu ve Cu/Ni/CuZn elektrotların 1,0 M KOH çözeltisindeki kronoamperometri eğrileri. b: Cu/Ni/CuZn elektrotunun kronoamperometri ölçümünden sonraki SEM görüntüsü (Büyütme: 20 000X). c: Cu/Ni/CuZn elektrotunun 1,0 M KOH çözeltisindeki 1. ve 300. döngüden sonra, 50 mV s<sup>-1</sup> tarama hızında elde edilen dönüşümlü voltamogramları.

#### 4. Sonuçlar

Özet olarak, CuZn elektrot başarılı bir şekilde bakır elektrot yüzeyinde sentezlendi. Bakır elektrotun korozyon dayanımını arttırmak için bakır yüzeyi ince bir Ni filmi ile kaplanmıştır. Kaplamadan aktif Zn metalinin kısmen uzaklaştırılması SEM görüntülerine göre yüzeyin daha gözenekli hale gelmesini sağlayarak HER için aktif merkezlerin sayısını arttırmıştır. EDX spektrumuna ve CV eğrilerine göre CuZn elektrotta ilgili metallerin karakteristik pikleri elde edilmiştir. Bu da kaplamanın Cu/Ni yüzeyinde başarılı bir şekilde oluşturulduğunu göstermektedir. AFM görüntülerinden CuZn kaplamanın yüzey alanının daha fazla olduğu görülmüştür. Elektrokimyasal ölçümlere göre Cu/Cu elektrotla kıyasla Cu/Ni/CuZn elektrotta daha yüksek yük değişimi akım yoğunluğu, daha düşük HER aşırı gerilimi ve Tafel eğimi ve sabit akım yoğunluklarında daha düşük aşırı gerilimler oluşmuştur. Zn metalinin kısmi olarak kaplamadan uzaklaştırılması elektrot yüzey alanını arttırmış, Zn ve Cu arasındaki sinerjistik etki nedeniyle farkedilebilir derecede HER etkinlik artırmıştır. Kararlılık ve dayanıklılık testlerine göre ise Cu/Ni/CuZn elektrot çalışılan ortamda nikel kaplama ile CuZn'nin kuvvetli etkileşimi nedeniyle yüksek performans sergilemiştir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak Cu/Ni/CuZn elektrotta Ni kaplı elektrotlar ile kıyaslanabilir ölçüde yüksek etkinliğin oluştuğu söylenebilir. Bu nedenle ticari elektroliz sistemleri için Cu/Ni/CuZn elektrot, Ni kaplı elektrotlara alternatif bir elektrot olarak önerilebilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma MAÜ.BAP.20.SBF.001 nolu projesi ile Mardin Artuklu Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Mardin Artuklu Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim. Şırnak Üniversitesi öğretim üyesi Doç. Dr. Ali Döner'e rehberliği için müteşekkirim.

#### Kaynaklar

- [1] Wang J, Kong H, Zhang J, Hao Y, Shao Z, Ciucci F. Carbon based electrocatalysts for sustainable energy applications. *Prog Mater Sci*, In press, 2020; 1-54.
- [2] Wang J, Yue X, Yang Y, Sirisomboonchai S, Wang P, Ma X, Abudula A, Guan G. Earth-abundant transition-metal-based bifunctional catalysts for overall electrochemical water splitting: A review. *J Alloys Comp* 2020; 819(153346): 1-23.
- [3] Shervedani RK, Alinoori AH, Madram AR. Electrocatalytic activities of nickel-phosphorous composite coating reinforced with codeposited graphite carbon for hydrogen evolution reaction in alkaline solution. *J New Mater Electrochem Syst* 2008; 11: 259-265.
- [4] Safizadeh F, Ghali E, Houlachi G. Electrocatalysis developments for hydrogen evolution reaction in alkaline solutions - A Review. *Int J Hydrogen Energy* 2015; 40: 256-274.
- [5] Paunovic P, Dimitrov AT, Popovski O, Slavkov D, Jordanov SH. Effect of carbon nanotubes support in improving the performance of mixed electrocatalysts for hydrogen evolution. *Macedonian J Chem Chem Eng* 2007; 26(2):87-93.
- [6] Jin Z, Zhang L. Performance of Ni-Cu bimetallic co-catalyst g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanosheets for improving hydrogen evolution. *J Mater Sci Technol*, 2020; 49:144-156.
- [7] Xiang R, Duan Y, Tong C, Peng L, Wang J, Shah SSA, Najam T, Huang X, et al. Self-standing FeCo prussian blue analogue derived FeCo/C and FeCoP/C nanosheet arrays for cost-effective electrocatalytic water splitting. *Electrochim. Acta* 2019; 302: 45-55.
- [8] Sun J, Zhu D, Sun Y, Ma L, Guo J, Liu Q, Zhang X. Hybrid NiCo hydrogen carbonate with Pt nanoparticles on nickel foam for alkaline water hydrogen evolution. *Journal of Alloys and Compounds* 2020; 833(155131): 1-8.
- [9] Wang Y, Pan L, Chen Y, Shen G, Wang L, Zhang X, Zou J. Mo-doped Ni-based catalyst for remarkably enhancing catalytic hydrogen evolution of hydrogen-storage materials. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45: 15560-15570.
- [10] Zhao G, Lin Y, Rui K, Zhou Q, Chen Y, Dou SX, Sun W. Epitaxial growth of Ni(OH)<sub>2</sub> nanoclusters on MoS<sub>2</sub> nanosheets for enhanced alkaline hydrogen evolution reaction. *Nanoscale*, 2018;10:19074-19081.
- [11] Solmaz R, Döner A, Doğrubaş M, Erdogan IY, Kardaş G. Enhancement of electrochemical activity of Raney type NiZn coatings by modifying with PtRu binary deposits: Application for alkaline water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy*, 2016; 41: 1432-1440.
- [12] Crnkovic FC, Machado SAS, Avaca LA. Electrochemical and morphological studies of electrodeposited Ni-Fe-Mo-Zn alloys tailored for water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy* 2004; 29: 249-254.
- [13] Solmaz R, Döner A, Kardaş G. Preparation, characterization and application of alkaline leached CuNiZn ternary coatings for long-term electrolysis in alkaline solution. *Int J Hydrogen Energy* 2010; 35: 10045-10049.
- [14] Döner A, Solmaz R, Kardaş G. Fabrication and characterization of alkaline leached CuZn/Cu electrode as anode material for direct methanol fuel cell. *Energy* 2015; 90: 1144-1151.
- [15] Akshatha R. Shetty, Ampar Chitharanjan Hegde, Effect of TiO<sub>2</sub> on electrocatalytic behavior of Ni-Mo alloy coating for hydrogen energy. *Mater Sci Energy Technol* 2018; 1: 97-105.

- [16] Burke LD, Collins JA, Role of surface defects in the electrocatalytic behaviour of copper in base. *Journal of Applied Electrochemistry*, 1999;29:1427-1438.
- [17] Burke LD, Collins JA, Murphy MA, Redox and electrocatalytic activity of copper in base at unusually low, premonolayer potentials *J Solid State Electrochem* 1999;4:34-41.
- [18] Pyun CH, Park SM. In situ spectro electrochemical studies on anodic-oxidation of copper in alkaline-solution. *J Electrochem Soc* 1986; 132: 2024-230.
- [19] Abd El Haleem SM, Ateya BG. Cyclic voltametry of copper in sodium hydroxide solutions. *J Electroanal Chem* 1981; 117:309-319.
- [20] Marioli JM, Kuwana T. Electrochemical characterization of carbohydrate oxidation at copper electrode. *Electrochim Acta* 1992; 37: 1187-1197.
- [21] Burke LD, Ahern MJG, Ryan TG. An investigation of the anodic behavior of copper and its anodically produced oxides in aqueous solutions of high pH. *J Electrochem Soc* 1990; 137: 553-561.
- [22] Marioli JM, Kuwana T, Electrochemical Characterization of Carbohydrate Oxidation at Copper Electrodes. *Electrochim. Acta*,1992;37:1187-1197.
- [23] Jayalakshmi M, Balasubramanian K, Cyclic Voltammetric Behavior of Copper Powder Immobilized on Paraffin Impregnated Graphite Electrode in Dilute Alkali Solution. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2008;3:1277 - 1287.
- [24] Heli H, Jafarian M, Mahjani MG, Gopal F, Electro-oxidation of methanol on copper in alkaline solution. *Electrochim. Acta*, 2004;49:4999-5006.
- [25] Raj MA, Arumainathan S. Comparative study of hydrogen evolution behavior of Nickel Cobalt and Nickel Cobalt Magnesium alloy film prepared by pulsed electrodeposition. *Vacuum* 2019; 160: 461-466.
- [26] Wang K, Si Y, Lv Z, Yu T, Liu X, Wang G, Xie G, Jiang L. Efficient and stable Ni-Co-Fe-P nanosheet arrays on Ni foam for alkaline and neutral hydrogen evolution. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45: 2504-2512.
- [27] Chen Z, Duan X, Wei W, Wang S, Ni B. Recent advances in transition metal-based electrocatalysts for alkaline hydrogen evolution. *J. Mater. Chem. A*, 2019; 7: 14971-15005.
- [28] Liu Y, Lu H, Kou X. Electrodeposited Ni-Co-Sn alloy as a highly efficient electrocatalyst for water splitting. *Int J Hydrogen Energy* 2019; 44: 8099-8108.
- [29] Yu L, Lei T, Nan B, Jiang Y, He Y, Liu CT. Characteristics of a sintered porous Ni-Cu alloy cathode for hydrogen production in a potassium hydroxide solution. *Energy* 2016;97:498-505.
- [30] He X, Xu F, Li F, Liu L, Wang Y, Deng N, Zhu Y, He J, Composition-performance relationship of Ni<sub>x</sub>Cu<sub>y</sub> nanoalloys as hydrogen evolution electrocatalyst. *J Electroanal Chem* 2017;799:235-241.
- [31] Li Y, Zhang X, Hu A, Li M, Morphological variation of electrodeposited nanostructured Ni-Co alloy electrodes and their property for hydrogen evolution reaction. *Int J Hydrogen Energy* 2018; 43: 22012-22020.
- [32] Liu H, Zeng S, He P, Dong F, He M, Zhang Y, Wang S, Li C, Liu M, Jia L, Samarium oxide modified Ni-Co nanosheets based three-dimensional honeycomb film on nickel foam: A highly efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *Electrochimica Acta* 2019;299:405-414.
- [33] Shetty S, Hegde AC, Magnetically Induced Electrodeposition of Ni-Mo Alloy for Hydrogen Evolution Reaction. *Electrocatalysis* 2017;8:179-188.
- [34] Gomez MJ, Franceschini EA, Lacconi GI, Ni and Ni<sub>x</sub>Co<sub>y</sub> Alloys Electrodeposited on Stainless Steel AISI 316L for Hydrogen Evolution Reaction. *Electrocatalysis* 2018;9:459-470.
- [35] Miulovic SM, Lj S. Maslovara, Perovic IM, Nikolic VM, Kaninski MPM. Electrocatalytic activity of ZnCoMo based ionic activators for alkaline hydrogen evolution—Part II. *Appl. Catal. A* 2013; 451: 220-226.
- [36] Telli E, Farsak M, Kardaş G. Investigation of noble metal loading CoWZn electrode for HER. *Int J Hydrogen Energy* 2017; 42: 23260-23267.
- [37] M.J. Giz, S.C. Bento, E.R. Gonzalez, NiFeZn codeposit as a cathode material for the production of hydrogen by water electrolysis. *Int J Hydrogen Energy* 2000; 25: 621-626.
- [38] Jin T, Liu X, Wang H, Wu X, Zhang Y. Mechanochemical-assisted synthesis of ternary Ru-Ni-S pyrite analogue for enhanced hydrogen evolution performance. *Carbon* 2020; 162: 172-180.
- [39] Zhu M, Yan Y, Yan Q, Yin J, Cheng K, Ye K, Zhu K, Yan J, et al. In situ growth of Ni<sub>0.85</sub>Se on graphene as a robust electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *Int J Hydrogen Energy* 2020; 45: 10486-10493.





## Sürdürülebilir Ulaşım İçin Güneş Enerjili Teknelerin Kullanılması ve Çevresel Etkileri

Şafak HENGİRMEN TERCAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye  
<sup>\*1</sup> safak.tercan@hku.edu.tr

(Geliş/Received: 25/08/2020;

Kabul/Accepted: 21/10/2020)

**Öz:** Sürdürülebilir ulaşım, taşımacılığın çevresel olumsuz etkilerinin azaltılması ve yenilenebilir enerjilerin kullanılması için yenilikçi bir sektördür. Güneş enerjisi ise sadece elektrik üretimi için değil aynı zamanda ulaşım sektörü için de alternatif bir enerji kaynağıdır. Bu çalışmada, baraj gölleri, içme suyu kaynakları ve hassas ekosistemler gibi doğal güzellikleri bulunan alanlarda oluşan turistik bölgelerde, sürdürülebilir ulaşım türü olan güneş enerjili teknelerin kullanılması ve çevresel etkileri araştırılmıştır. Araştırmada, Türkiye’de ilk kez uygulaması yapılan ve iç hizmetleri için gerekli elektrik ihtiyacını güneş enerjisinden sağlayan bir tur teknesinin çevresel etkileri 2 şekilde incelenmiştir. İlk değerlendirme güneş enerjisi sisteminin simülasyon sonuçlarına göre yapılmıştır. Daha sonra tekne 1 yıllık işletme süresi sonuçlarına göre tekrar değerlendirilmiş ve %16 yakıt tasarrufu gerçekleştiği hesaplanmıştır. Gerçekleşen sonuçlara göre 1 tekne için yıllık yaklaşık 4 ton CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı sağlanmıştır. Sonuçlar, sürdürülebilir ulaşım konusundaki çalışmalara örnek oluşturacak ve hassas ekosistemlerdeki ulaşımın çevresel etkilerini azaltarak bu bölgelerin sürdürülebilirliğini artıracaktır.

**Anahtar kelimeler:** Sürdürülebilir ulaşım, güneş enerjili tekne, iklim değişikliği, emisyon azaltımı.

### Solar Boats for Sustainable Transportation and Their Environmental Impacts

**Abstract:** Sustainable transport is an innovative sector to reduce the negative environmental effects of transport and to use renewable energies. Solar energy is an alternative energy source not only for energy production but also for the transportation sector. This study, researched a solar powered boat for sustainable transportation in the touristic areas, such as dam lakes, drinking water sources and sensitive ecosystems. A touristic boat is equipped with photovoltaic panels for all internal services required in the touristic boats and aimed to decrease the environmental impacts. The environmental impacts are evaluated in two ways. The first evaluation was made according to the simulation results of the solar energy system before the installation of photovoltaic panels. Secondly, the boat was re-evaluated according to the 1-year operating period results after the photovoltaic panels installed and a 16% fuel saving was calculated. Approximately, 4 tons of CO<sub>2</sub> emission reduction is achieved for 1 boat according to the 1-year operating period results. The results will support the studies on sustainable transport and increase the sustainability of the regions by reducing the environmental impacts of transport in sensitive ecosystems.

**Key words:** Sustainable transport, solar boat, climate change, emission reduction.

### 1. Giriş

İklim değişikliği 21. yüzyıl için dünyanın en önemli sorunlarından birisidir ve kentsel sürdürülebilirlik konusu insanlık için kritik bir başlıktır [1]. İklim değişikliği sorunu, su kuraklıkları, yüksek sıcaklıklar, yüksek yağmur yoğunlukları veya yüksek rüzgâr rejimleri gibi çeşitli şekillerde ortaya çıkmaktadır. Özellikle adalar, kıyılar, nehir havzaları, baraj gölleri, içme suyu kaynakları ve sulak alanlar gibi hassas ekosistemler korunması gereken bölgelerdir. Uzmanlar hassas ekosistemlerde görülen iklim değişikliği etkilerini azaltmak amacıyla birçok azaltım ve uyum faaliyetleri yapmaktadır. Bu bölgeler, doğal güzellikleri ve içlerinde barındırdıkları canlı türleri ile çeşitli turistik faaliyetler için de cazip yerlerdir. Turizmin canlandığı bu bölgeler, teknelerle ve gemilerle gezinti, durgun su sporları adıyla anılan kano, kürek, su bisikleti ve yelken spor dalları gibi çok sayıda turistik aktiviteye de sahiptir.

Türkiye’de 2020 yılı itibarı ile 76 adet tescilli sulak alan ve 504 baraj bulunmaktadır [2]. Baraj göllerinde elektrik üretimi ve sulama faaliyetlerinin yanı sıra turizm, balıkçılık veya kuş gözlemleri gibi çeşitli ticari ve bilimsel faaliyetler de yapılmaktadır. Uygun olan baraj göllerinde, turistlerin teknelerle gezinti yapmaları bölgede yaşayan halk için önemli bir iş imkânı yaratmaktadır. Baraj gölleri, aynı zamanda içme suyu kaynağı olarak da kullanılmaktadır. Bu sebeple, baraj göllerinde kullanılan ulaşım türlerinin çevresel zararlarının çok düşük veya temiz teknolojiler kullanan sürdürülebilir ulaşım türleri olması gerekmektedir. Elektrikli tekneler veya güneş

\* Sorumlu yazar: [safak.tercan@hku.edu.tr](mailto:safak.tercan@hku.edu.tr). Yazarın ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-1729-6421

enerjisi ile çalışan tekneler bu konuda çözüm sunmaktadır. Ancak, Türkiye’de hassas ekosistemlerde böyle bir ulaşım türü için daha önce yapılmış herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, Fırat Nehri üzerindeki Birecik Baraj gölünün oluşmasıyla turistik bir bölge haline gelen Gaziantep-Rumkale ve Halfeti’de sürdürülebilir ulaşım için turistik tur teknelerinde güneş enerjisi kullanılması araştırılmıştır. Birecik Baraj Gölünde bir pilot proje uygulaması olarak yapılan ve iç hizmetleri için gerekli elektrik ihtiyacını güneş enerjisinden sağlayan bir teknenin çevresel etkileri simülasyon sonuçlarına ve 1 yıllık işletim verilerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, Birecik Baraj Gölünde sürdürülebilir ulaşım ve sürdürülebilir turizme katkı sağlarken içme suyu kaynağı olan baraj gölünün kirlenmesini önleyecek çözümler sunmaktadır.

### 1.1. Literatür araştırması

35.000 km sahil şeridi olan Avustralya, korunması gereken hassas ekosistemler için iyi bir örnektir. Ülkede deniz turizmi yapılan cazibe merkezlerinde oluşan sera gazı emisyonları yıllık 70.000 ton CO<sub>2</sub> eşdeğeridir. Bu miktar aynı zamanda Avustralya’da sera gazı üretimi açısından en hızlı büyüyen sektör olan ulaştırma sektörünün %1’ini oluşturmaktadır. Avustralyalı tur teknesi işletmecileri ile ilgili bir çalışmaya göre; bir turist karbondioksit ayak izi, dizel motorlu bir tekne turuna katıldığı takdirde turist başına 61 kg CO<sub>2</sub>, benzin motorlu bir tekne turuna katıldığı takdirde ise turist başına 27 kg CO<sub>2</sub> eşdeğeridir. Bu emisyon değerleri, standart bir binek aracında 300km veya 140 km sürüş yapan tek bir kişinin oluşturduğu emisyon değerine eşittir [3].

Benzer şekilde dünyadaki diğer adalar, turizmin olumsuz etkileri ile karşı karşıyadır. Özellikle Akdeniz ve Karayip bölgelerindeki çok sayıda ada, kitle turizmi ile özdeşleşmiştir. Adaların coğrafi, kültürel, ekolojik ve ekonomik özellikleri ziyaretçileri çekerken, bu unsurların kırılabilirliği ve sınırlamaları ada ortamını ve topluluklarını turizm baskılarına karşı daha savunmasız hale getirmektedir [4]. Yenilenebilir enerji kaynakları bu problemler için iyi bir çözüm olabilmektedir. Turizm açısından cazibe merkezi olan bazı bölgelerde çeşitli projeler uygulanmıştır. Örneğin; Tayland’daki Koh Jik adasında elektrik ihtiyacını karşılamak için teknolojik ve ekonomik bilgiler sağlamak üzere bir dizi mikro-grid senaryosu modellenmiş ve değerlendirilmiştir. Uygulanan projelerde, fotovoltaik (PV) paneller ile elektrik üretilmiş ve 2 çeşit akü bu elektrikle şarj edilmiştir. Sonuçlara göre, en düşük elektrik maliyeti Li-ion aküler kullanıldığında 0.220 €/kWhs olarak elde edilmiş, en düşük proje geri ödeme süresi de kurşun asit aküler kullanıldığında 0.307 €/kWhs ve 6,3 yıl olarak oluşmuştur [5]. Maldivler’de bir başka mikro-grid projesi hayata geçirilmiştir. Rüzgâr ve güneş sistemlerini kullanarak hibrit bir tasarım yapılmıştır. Kullanıcılardan, taleplerini gerektiği zaman ayarlayarak gönüllü olarak tüketim yüklerini azaltmaları istenmiştir [6].

Avrupa Ülkelerinin iddialı hedefleri ile dünyadaki yenilenebilir enerji sektörü büyümektedir. Çoğu ülke 2015 yılında Paris Anlaşması’nı imzalamış ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için kendi hedeflerini belirlemiştir. Bazıları önümüzdeki yıllarda %100 yenilenebilir enerji kullanımına ulaşmayı planlamaktadırlar. 2050 Danimarka enerji sistemi için %100 yenilenebilir enerji senaryosunu kullanan bir çalışma, mevcut elektrik piyasası yapısının bu hedefe geçiş için gerekli rüzgâr enerjisi miktarlarını finansal olarak sürdüremediği sonucuna varmıştır. Danimarka’nın hedeflerinin gerçekleştirilmesi için elektrik ticaretinin kurumsal yapısının yeniden şekillendirilmesi gerekmektedir [7]. Diğer yandan, Akdeniz havzasında bulunan Türkiye, büyük bir yenilenebilir enerji potansiyeline ve bunu kullanmak için birçok teşvike sahiptir. Ülkenin gerçekleştirilebilir yenilenebilir enerji potansiyeli, AB-27’nin toplam yenilenebilir enerji potansiyelinin %13’üne eşittir. Türkiye’nin güneş potansiyelinin yaklaşık %0,45’i kullanılabilir hale getirilmiştir. Son yıllarda da, güneş ve rüzgâr enerjisi gibi teknolojiler enerji üretiminde etkili olmaya başlamıştır [8].

Güneş enerjisi sadece enerji üretimi için değil aynı zamanda ulaşım sektörü için de çok etkilidir. Sürdürülebilir ulaşım, taşımacılığın çevresel olumsuz etkilerinin azaltılması ve yenilenebilir enerjilerin kullanılması için yenilikçi bir sektördür. Sürdürülebilir ulaşım hakkında 2000-2019 yılları arasında yayınlanan makalelerin derlendiği bir çalışmanın analiz sonuçlarına göre, “araçlar için yeni yakıtlar” konusu derleme makalesinde belirtilen 9 önemli araştırma konusundan biridir [9]. Aynı zamanda, araştırmacılar, yeni bir yakıt alternatifi ve iklim değişikliğinin hafifletilmesi için güneş enerjili tekneleri üzerinde çalışmaktadır. Tanzanya’da yapılan bir çalışmada, balıkları ağlarına çekmek için gazyağı fenerleri kullanan balıkçılara alternatif bir enerji kullanmaları önerilmiştir. Bu alternatifte, balıkçılar akülerle çalışan LED aydınlatma sistemini kullanmışlar ve 3-4 ay geri ödeme süresi ile yatırımlarını geri döndürmüşlerdir. Bu sayede, aydınlatma ekipmanı ve yakıt harcadıkları kazançlarının %35 ila %50’sini tasarruf etmişlerdir [10].

Dünya çapında elektrikli tekneler giderek daha da ilgi çekici olmaya başlamış ve elektrikli arabalarla benzer şekilde kendilerini mevcut pazarı geliştiren teknoloji olarak konumlandırmışlardır. Günümüzde, nakliye gemileri ve savaş gemileri dâhil modern gemilerde, elektrikli tahrik sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Araştırmacılar, yalnızca tahrik sistemini değil, aynı zamanda navigasyon ve gemi hizmetleri gibi diğer tüm hayati işlevleri de içeren tamamen elektrikli gemiler üzerinde çalışmaktadırlar [11]. Teknelerdeki fotovoltaik paneller yenilikçi ve etkin bir çözüm olarak çalışılmaktadır. Avrupa’da güneş enerjisi ile çalışan tekne örnekleri piyasada kullanılmaktadır (Şekil 1). Avusturyalı bir şirket güneş enerjili birkaç model tekneyi piyasaya sürmüştür. Maksimum 3-4 kişilik olan bir modelde 800 W bir güverte üstü motor ve 5 kW’s bir kurşun asit akü bulunmaktadır. Bu teknedeki güneş panelleri yaklaşık olarak 4 m<sup>2</sup> kaplamakta, 0,4 kWp bir pik kapasitesi bulunmakta ve yaz döneminde günlük olarak 1,6 kW’s elektrik üretmektedir. Bu tekne 6,5 saat tam güçte 4,7 knot sürüş hızı ile çalışabilmekte ve 3 günde şarj edilmektedir. Dolayısıyla, bu tekne hafta sonu kullanımı için uygundur [12].



Şekil 1. Avrupa’da kullanılan güneş enerjili tekne örnekleri.

Diğer bir model, güneş enerjili tekne-taksidir. Bu taksit bir iskeleden diğerine 7 kişiye kadar insan taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır. 4,4 kW bir motora ve yaklaşık 1 kWp güneş ve 17,5 kW’s kurşun asit akü kapasitesine sahiptir. Akü sistemini şarj etmesi yaklaşık olarak 5 gün aldığı için bu taksitin kullanımı da sınırlıdır. Katamaran tipi bir başka tekne, iki adet 8 kW elektrik motora ve maksimum 46 yolcu kapasitesine sahiptir. Teknenin çatısına monte edilmiş toplam 6 kWp’lik fotovoltaik panellere ve 5 knot hıza sahip olan bu 20 tonluk tekne, omurgasına saklanmış olan 46 kW’s’lik akü sistemi ile 8 saate kadar çalışabilmektedir [13].

Daha büyük yolcu feribotları da elektrikli motor, lityum iyon akü takımı ve entegre fotovoltaik modüller tarafından beslenen güneş enerjili örnekler sunmaktadır. Hindistan’da üretilen, 75 yolcu kapasiteli, güneş enerjili bir feribot iki adet 20 kW asenkron elektrik motora sahiptir. Teknenin çatısındaki 20 kWp polikristalin fotovoltaik paneller ve maksimum 7,5 knot seyir hızı ile 20 m uzunluğundaki ve 7 m genişliğindeki tekne güneşli günlerde 6 saate kadar ve bulutlu günlerde 4,5 saate kadar çalışabilmektedir. Akü takımı 2 adet 25 kW’s Lityum demir fosfat aküden oluşmaktadır [14].

## 1.2. Teknelerin çevresel etki analizi

Deniz ulaşımı, yanan yakıt atıklarının salınması ve ses emisyonu yolu ile deniz ekosistemlerinin kirlenmesinin en önemli 3’üncü kirlilik kaynağıdır [15]. Deniz kirliliğinin %12’si deniz temelli faaliyetlere yani deniz ulaşımı, hidrokarbonların ve tehlikeli maddelerin nakliyesi, liman faaliyetleri, tekne/liman ara yüzü, petrol sızıntısı gibi kazalar, gaz artımı, diğer salınımlar ve eğlence için deniz yolculuğuna atfedilebilir [16]. Güneş enerjisinin kullanımı deniz, baraj ve hassas ekosistemlerde kirliliğin önlenmesi bakımından önemli bir çözümdür. Türkiye’de 2010 tarihli “İç Sularda Çalışan Gemi ve İç Su Araçları Yönetmeliği” Madde 8-(1)’e göre; içme ve kullanma suyu temin edilen iç sularda akaryakıt ile çalışan kayık, motor ve benzeri araçların kullanılmasına izin verilmez ancak bazı mecburi durumlarda belirli şartlara bağlı olarak Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğüne izin verilebilmektedir. [17] Avrupa Birliği Yönergesi 92/75/EEC [18], tekne teçhizatlarının da içerisine girdiği bir enerji tüketimi etiketleme şeması oluşturmuştur. Rumkale-Halfeti teknelerinin çevresel etkilerini değerlendirmek için hava kalitesi, su kalitesi ve gürültü kirliliği göz önüne alınacaktır:

### 1.2.1. Hava kalitesi

CO gazı, benzin veya propan gibi yakıtlar yandığında üretilen ölümcül bir zehirdir. Motor egzozunda bulunan ve tamamlanmamış yanmanın neden olduğu birçok kimyasaldan birisidir. CO renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olduğundan dolayı, maruz kalan insanı hiçbir uyarı olmaksızın alt edebilir. İlk semptomlar arasında baş ağrısı, baş dönmesi, sersemleme ve mide bulantısı yer alabilir. Uzun süreli ya da yüksek maruziyetlerle karşılaşılması durumunda, semptomlar kusma, bilinç kaybı ve bayılma olarak ilerler [19].

Amerika'da Sağlık ve İnsan Hizmetleri Biriminin 2003'te yayınladığı "Çeşitli İşletim Koşulları Altındaki Gezinti Teknelerinde Karbon monoksit emisyonu ve maruziyeti" [20] isimli araştırma, tehlikeli CO gazının konsantrasyonlarının birçok gezinti teknesi modelleri ve markalarında meydana geldiğini göstermektedir. Bu problem hem eski hem de yeni tekneler ve motorlarda oluşmaktadır. Üç farklı yöntem ile ölçülmüş olan CO konsantrasyonları, birçok tekne için 1.200 ppm eşiğine yaklaşıldığını veya bunun geçildiğini göstermiştir [20]. Bu yüksek CO maruziyetleri insan sağlığına kötü etki etmektedir. Güneş enerjili tekne konseptine geçiş hava kalitesi üzerinde büyük bir pozitif etkiye sahip olacaktır. Elektrikli bir motorun güneş enerjili PV sistemi ile çalışan bir motora dönüştürülmesi bütün temel fosil yakıt tüketiminin yerini alacak ve fosil yakıtlardan kaynaklanan bütün emisyonları ortadan kaldıracaktır.

### 1.2.2. Su kalitesi

Suyun kalitesi tekne motorları da dâhil olmak üzere birçok kaynak yolu ile suya doğrudan eklenebilecek olan metaller (kurşun, kadmiyum, cıva), besin maddeleri (fosfor, nitratlar) ve hidrokarbonlar (metan, benzin, petrol temelli ürünler) tarafından negatif yönde etkilenmektedir [21]. Besin maddeleri göllerde ve nehirlerde yosun büyümesine etki edebilir ve çözünmüş oksijen ve pH seviyeleri biyo-çeşitliliğin türünü ve çokluğunu etkilerken, su berraklığı üzerinde bir etkiye sahip olabilir. Buna ek olarak, bu maddeler su kaynağının aynı zamanda içme suyu kaynağı olarak kullanıldığı durumlarda insan sağlığı üzerinde de etkilere sahip olabilir [21]. Tekne motorları büyük miktarda güç sağlamak için tasarlanmışlardır. Bu nedenle, yolculuk sırasında bir miktar yakıt yanmadan suya karışmaktadır. Suyu ne kadar yakıtın geçeceği konusunda tahminler çeşitlilik göstermekte ve motor hızı, ayar, yakıt karışımı ve güç gibi faktörlere dayanmaktadır. Ancak, tüm dıştan takma motorlarda yaklaşık %25 ila %30 kadar yakıtın yanmadan doğrudan suya karışması makul bir ortalama olarak kabul edilmektedir [21]. Bu sebeple, Avrupa'daki birçok ülkedeki tatlı su göllerinde iki zamanlı dıştan takma motorların kullanımı yasaklanmıştır [22]. Teknelerde, yanmamış veya tam olarak yanmamış yakıt, petrol partikülleri veya kalıntıları çevreye salınmaktadır. Kirlilik yaratan maddelerin miktarı az olsa da, belirli bölgelerde birikerek özellikle de tekneler bağlı dururken etraftaki su üzerinde petrol filmine neden olmaktadır. Güneş enerjili tekne konseptine geçiş Halfeti'nin su kalitesi üzerinde çok büyük bir pozitif etkiye sahip olacaktır. Elektrikli bir motorun güneş enerjili PV sistemine dönüştürülmesi bütün temel yakıt tüketimini değiştirir.

### 1.2.3. Gürültü kirliliği

Teknelerden kaynaklanan gürültü, deniz memelileri, balıklar ve kuşlar da dahil olmak üzere, deniz hayvanlarında rahatsızlığa neden olmaktadır [23]. Turist teknelerinin ses etkisi insanlar ve gezinti deneyimi üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Teknelerden gelen sesin temel kaynağı motor tarafından üretilir ve atmosfer yolu ile dağılır veya aracın gövdesi yolu ile aktarılabilir. Havaya ya da suya aktarılan sesin hacmi motorun boyutuna, tasarımına ve konumuna ve aracın büyüklüğüne ve inşa edilmiş şekline göre değişecektir. Bu gürültü aralığı, 10 m uzaktaki bir dizel kamyon ile rahatsızlık eşiği arasında yani 90-120 dB (desibel) seviyelerinde olabilmektedir [24]. Güneş enerjili tekne konseptine geçiş ses emisyonu üzerinde büyük bir pozitif etkiye sahip olacaktır. Bir elektrikli motorun transferi özellikle yanmış egzoz gazlarının ortadan kaldırılması dolayısıyla ve motorun hareketli kısımlarının azaltılması ile ses seviyelerini önemli ölçüde azaltacaktır. Ses seviyesinin azaltılması ve ortadan kaldırılması turistlerin de yolculuk deneyimlerini pozitif yönde etkileyecektir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Simülasyon ve tekne özellikleri

Çalışmada PV\*SOL [25] simülasyon programı kullanılarak Rumkale-Halfeti bölgesinin güneş enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. PV\*SOL simülasyon programı güneş enerjisi sistemleri tasarlar, sistemin

büyüklüğü ve yönü, elektrikli cihazların sayısı ve kullanım süresi, sistemin bulunduğu bölgenin genel iklim koşulları ve güneş radyasyonu, yerel şebeke dağıtımı gibi çok sayıda faktörü hesaba katmaktadır. Simülasyon programı ile sistem kapasitesi, yıllık güç üretimi ve performansı hesaplanarak gerekli olan batarya sistemi ve invertör gücü belirlenmiştir.

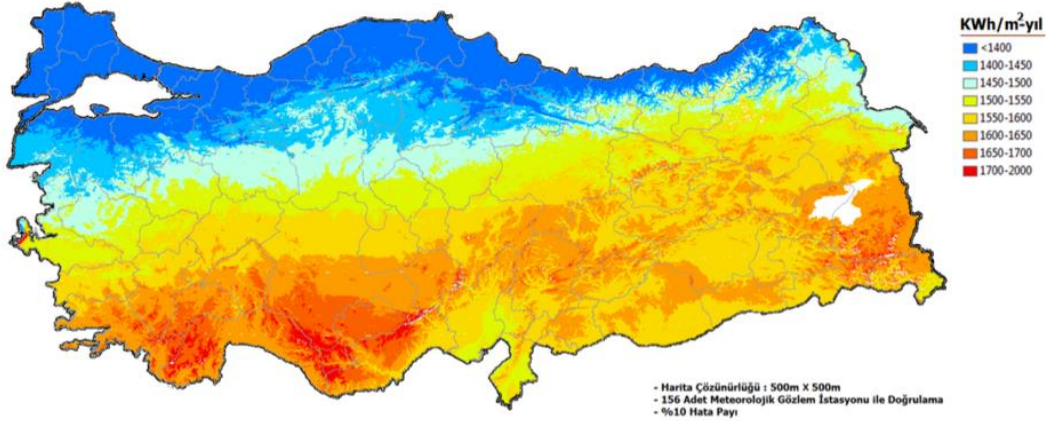
Çalışmada kullanılacak olan tekne bölgede çalışan turistik tur teknelerinden en yaygın tasarımlardan birisi olarak seçilmiştir. 25 tonluk ve 45 yolcu kapasiteli bir teknedir. Teknenin mevcut teknik durumu yerinde yapılan gözlemlerle elde edilmiştir. Tekne üzerine kurulması planlanan panel ağırlıklarının teknenin dengesinin bozulması ile ilgili hesaplar ve daha verimli tekne tasarımları hazırlanması bu çalışmada incelenmemiştir. Güneş panelleri teknenin üst güvertesine gölgelik şeklinde monte edilmiş ve iç servis hizmetlerinde kullanılacak elektriği güneşten üretecek şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada iki şekilde emisyon azaltım hesaplaması yapılmıştır. İlk olarak, montajı yapılan güneş panellerinden elde edilmesi planlanan enerji hesapları ile tahmini bir emisyon azaltımı hesaplanmıştır. Daha sonra tekne 1 yıl boyunca işletilmiş ve gerçekleşen dizel yakıt kullanımına göre karbon emisyonları hesaplanmıştır. Her iki hesaplamada IPCC'nin (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006 Kılavuzu Yöntemi kullanılmıştır [26].

## 2.2. Çalışma alanı

Gaziantep, Türkiye'deki en hızlı büyüyen şehirlerden ve en dinamik kentsel ekonomilerden birisidir. Gaziantep'in nüfusu 2020 yılı itibari ile yaklaşık 2,1 milyondur [27]. Gaziantep, genç nüfusu, büyük dinamik ekonomik yapısı, gastronomi turizmi ve diğer turizm potansiyeli ile bir cazibe merkezidir. Yüzölçümünün ¼'ü Fırat Nehri'nden yararlanan verimli tarımsal topraklardır.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanmış olan ve Şekil 2'de gösterilen Türkiye'nin Güneş Enerjisi Haritasına [28] göre Gaziantep ve çevresinde, toplam yıllık ışıınım zamanı 2.698,5 saatin üzerinde (toplamda günlük 7,5 saat) [29] ve elde edilen toplam güneş enerjisi her yıl 1.500 kWh/m<sup>2</sup>'den veya günlük 4,2 kWh/m<sup>2</sup>'den fazladır.

Rumkale-Halfeti, Fırat nehrinin batı ve doğu kıyısında yer alan alanlardır. Halfeti küçük bir tarım kasabasıdır ve Gaziantep'e yaklaşık 100 km'dir. Kasabanın büyük kısmı 1990'larda Fırat Nehri üzerinde yer alan Birecik Barajının suları altında kalmıştır. Bölge bu nedenle tarım alanlarını kaybetmiş ancak baraj gölü ile görsel olarak çok güzel bir kanyona dönüşmüştür. Bu muhteşem kanyon kısa sürede turistlerin ilgisini çekmiş ve bölge Rumkale-Zeugma-Halfeti olarak turistik bir merkez olmuştur. Aynı zamanda sular altında kalmış olan Eski Halfeti kasabasının yapıları sualtı turizmi potansiyelini de barındırmaktadır. Halfeti'den Rumkale'ye turizm amaçlı dizel tur tekneleri çalışmaktadır. Bu tekneler, Rumkale'nin bulunduğu sarp kayalıkların arasından 20 dakika süren bir gezi turu düzenlemektedirler. Rumkale'de, hepsi iyi şekilde korunmuş olan bir cami, kilise ve manastır görülmektedir. Tekneler, sular altında kalmış olan başka bir kasaba olan Savaş'a kadar 10 dakika daha ilerler ve yaklaşık olarak 40 dakika sonra kendi limanı olan Halfeti'ye geri döner. Halfeti'de halen hizmet veren yaklaşık 40 turistik tekne vardır. Turistlerin sayısına ve seyahat taleplerine dayalı olarak tekneler günde 5 defa veya yılda yaklaşık 500 sefer yapmaktadırlar.



Şekil 2. Türkiye'nin ışıınım haritası [28].

### 3. Sonuçlar

Bölge, Gaziantep'e yakın olarak güneş enerjisi potansiyeli açısından çok avantajlı bir konuma sahip olduğu için yıllık ortalama gün ışığı süresi 2978 saat ve toplam güneş enerjisi potansiyeli 1586 kWh/m<sup>2</sup>'dir [28]. Gaziantep'in potansiyeli hakkındaki kabaca tahminlere göre 100 kW'lık bir PV montajı yaklaşık olarak 166,100 kWh güneş enerjisi elektriği üretebilmektedir [28]. Kurulan sistemin kriterleri simülasyon programında, sabit sistem, %14 sistem kaybı, %96 inverter verimliliği ve doğru akımdan alternatif akıma dönüştürülme katsayısı 1,2 olarak alınmıştır. Kurulan sistem teknenin üst güvertesine aynı zamanda gölgelik olacak şekilde monte edilmiştir. Üst güverte 25 m<sup>2</sup> alana sahiptir ve 15 adet 1641x990x40 ölçülerindeki PV paneli Şekil 3'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Modüllerin ürün etkinliği %16.63'dür. Sistemdeki inverter 4400 W kapasiteye sahiptir ve 12 Voltluk ve 200 Ah'lık dört akü tekneye entegre edilmiştir. Kurulan sistem tur teknesinin iç hizmetlerini karşılayacak şekilde enerji üretecektir. Teknedeki iç hizmet enerji ihtiyacı ve beklenen tüketim şöyledir; ● Aküler, 4,8 kWh ● Televizyon, 400 W ● Navigasyon sistemi, 50 W ● Dizüstü bilgisayar, 50 W ● Aydınlatma sistemi, 150 W ● Ses sistemi, 300 W ● Pompalar, 500 W ● Buzdolabı, 400W ve ● Çay-kahve makinası, 1000 kW olarak belirlenmiştir. Teknenin motoru dizel motor olarak bırakılmış ve güneş panelleri tekne seyahat ederken veya hareket halinde değilken teknedeki iç hizmetler için gerekli olan elektriği karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Teknedeki PV paneller 24V ve 200 Ah 2 adet akü bataryasını şarj etmekte ve bir inverter aracılığıyla teknedeki 220 V hat üzerindeki yukarıda belirtilen iç hizmet yüklerini beslemektedir. Teknede jeneratör bulunmamaktadır. Aynı zamanda, Birecik Baraj Gölünde seyreden diğer teknelerin acil durum ihtiyaçlarında tekne kurtarma faaliyetlerine akülerle pompa desteği vererek yardımcı olacağı düşünülmüştür.



Şekil 3. Fırat Nehri üzerindeki tur tekneleri (solda) ve güneş enerjisi panelleri montajı yapılmış örnek tekne (sağda).

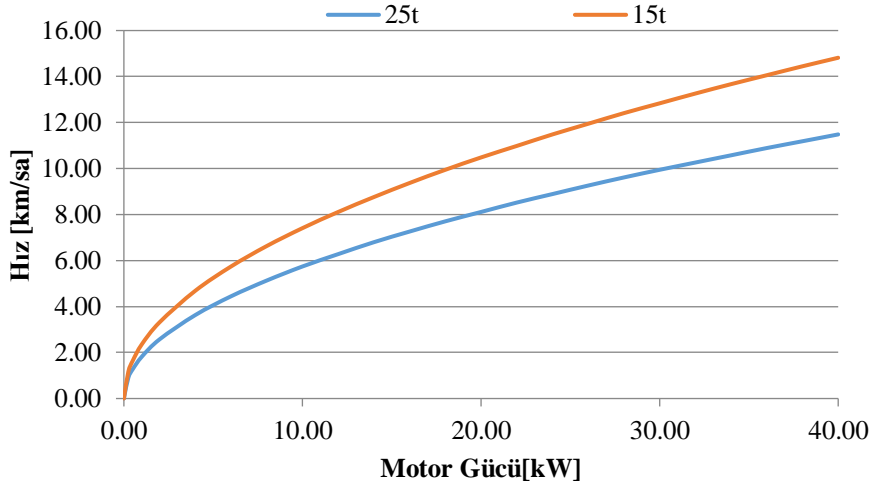
#### 3.1. Simülasyon sonuçları ve sistem analizi

Mevcut teknolojiler dikkate alındığında, Rumkale-Halfeti bölgesinde güneş enerjili teknelerin yaygınlaştırılmasında hem maksimize edilmiş fotovoltaik alan ve hem de maksimize edilmiş akü kapasitesinin uzun yol güneş enerjili yolculuğun ana bileşenleri olduğu açıktır. Tekneye kurulan fotovoltaik sistem simülasyonu için, yaklaşık 25m<sup>2</sup>'lik bir alana piyasada satılan güneş panellerinin kullanılacağı düşünülmüş ve fotovoltaik sistemin potansiyelinin hesaplanması için çatı üstü güneş enerjisi sistemi şeklinde hesaplamalar kullanılmıştır. Gaziantep'ten alınan iklim verilerini kullanarak PV\*SOL'da simüle edilmiş ve elde edilen bölgeye özel enerji verim tahmini Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** PV\*SOL simülasyon programı ile bölgeye özel enerji verim tahmini.

Ay	Bölgeye Özel Enerji Verimi	
OCAK	275 Wh/m <sup>2</sup> /g	6,88 kWhs/g
ŞUBAT	352 Wh/m <sup>2</sup> /g	8,80 kWhs/g
MART	543 Wh/m <sup>2</sup> /g	13,56 kWhs/g
NİSAN	687 Wh/m <sup>2</sup> /g	17,18 kWhs/g
MAYIS	766 Wh/m <sup>2</sup> /g	19,15 kWhs/g
HAZİRAN	874 Wh/m <sup>2</sup> /g	21,86 kWhs/g
TEMMUZ	849 Wh/m <sup>2</sup> /g	21,21 kWhs/g
AĞUSTOS	761 Wh/m <sup>2</sup> /g	19,02 kWhs/g
EYLÜL	659 Wh/m <sup>2</sup> /g	16,47 kWhs/g
EKİM	486 Wh/m <sup>2</sup> /g	12,15 kWhs/g
KASIM	349 Wh/m <sup>2</sup> /g	8,73 kWhs/g
ARALIK	272 Wh/m <sup>2</sup> /g	6,79 kWhs/g

Sistem simülasyonu, fotovoltaik sistemden 200 kWhs/m<sup>2</sup>/yıl bir verim ve 150Wp/m<sup>2</sup> pik kapasitesinin (bir modül yaklaşık 1,70 m<sup>2</sup>) beklenebileceğini göstermiştir. Ancak, yaz ayları boyunca günlük maksimum verim 3,5 kW pik kapasitesi ile günlük 21 kWhs'i geçmeyecektir. Dolayısıyla, istenilen güneş enerjili teknenin tamamen elektrikli motorla çalıştırılması için yalnızca güneş enerjisi kullanıldığında hız çok düşük olacaktır. Bu da bölgedeki turist yoğunluğunun talebini karşılayamayacaktır. Tur teknesi sahiplerinin 40-50 dakikada tamamlamak istedikleri tur güzergâhında yaklaşık 15 km/s hız ve 40 kW'lık bir motor gücü gerekmektedir. Ancak tekne çatısına kurulacak olan PV sistemin üreteceği maksimum 21 kWhs enerji bunu karşılayamayacaktır. Bu sebeple, akü sistemi teknenin iç hizmet tüketim kapasitesini karşılayabilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Ancak ileriki dönemlerde, yeni bir tekne yapılıırken eğer tekne tamamen elektrikli motorla çalıştırılacak şekilde tasarlanırsa, Şekil 4 istenen hızlara göre ve değişiklik gösteren tekne ağırlıkları için gerekli motor gücünü veya sabit hızda 1 saatlik sürüş için gerekli enerji talebini göstermektedir. Bu grafikte tekne ağırlığında %1 bir azalma enerji talebinde ve motor gücünde %0,44'lük bir azalmaya eşittir [29].

**Şekil 4.** Çeşitli hız seviyeleri ve ağırlıkları için motor güçleri arasındaki ilişki [29].

### 3.2. Sistem performansı ve emisyon azaltımı

Kurulan sistemin performansı öncelikle simülasyon sonuçlarına göre daha sonra ise 1 yıl boyunca işletilerek yakıt sarfiyatına göre hesaplanmıştır. Teknenin ürettiği enerjinin yakıt eşdeğeri ve işletme sırasındaki yakıt



tüketimindeki değişiklik tespit edilerek IPCC'nin 2006 Kılavuzunda belirlediği kriterlerle emisyon azaltım hesaplamaları yapılmıştır:

### 1- Simülasyon sonuçlarına göre potansiyel enerji hesapları ve emisyon azaltımı hesaplaması:

25 m<sup>2</sup> için simülasyon sonuçlarına göre fotovoltaik sistem tekneye entegre edilmiş 24 V akü bataryasını şarj etmekte ve inverter ile elde edilen 220 V alternatif akımdan yıllık 5.540 kW's sağlamaktadır. Enerji birimlerine göre dizel yakıtın %35 verimle elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü varsayarsak 1 litre dizel yakıt 3,5 kW's yapacaktır. Böylece 5.540 kW's'e karşılık gelen dizel miktarı yaklaşık 1583 lt olmaktadır. IPCC 2006 kılavuzuna göre yapılan hesaplamalarda dizel teknede 4,2506 tCO<sub>2</sub>/yıl emisyonunu azaltılmaktadır. Bu sistem bölgedeki tüm tur teknelerine yani toplamda 40 tekneye uygulanırsa azaltım yaklaşık 170,0249 tCO<sub>2</sub>/yıl olacaktır. Bölgedeki turizm sezonu yoğunluğu Haziran-Ağustos aylarındadır. Simülasyon sonuçlarına göre, turizm sezonu boyunca PV sistemi 74.508 kW's enerji üretecektir. Tasarlanmış olan sistem bu ihtiyacı karşıladığında 40 tekne için 57,0895 tCO<sub>2</sub>/yıl emisyon azaltımı yapacaktır. (Tablo 2.)

**Tablo 2.** PV\*SOL Simülasyon Verilerine Göre Emisyon Azaltım Miktarları.

Tekne Sayısı	Yıllık Üretilen Güneş Enerjisi Eşdeğeri Dizel (kg)*	CO <sub>2</sub> Emisyon (ton)*	Metan (CH <sub>4</sub> ) Emisyonu CO <sub>2</sub> eşdeğeri (t CO <sub>2</sub> eq/yıl)*	Azot Dioksit (NO <sub>2</sub> ) CO <sub>2</sub> eşdeğeri (t CO <sub>2</sub> eq/yıl)*	Toplam Emisyon Azaltımı (CO <sub>2</sub> ton/yıl)*
1	1.313,77	4,1860	0,0062	0,0583	4,2506
40	52.550,8	167,4427	0,2467	2,3353	170,0249
Turizm sezonu	17.669,04	56,2988	0,0054	0,7852	57,0895

\* IPCC 2006 kılavuzu Tablo 3.2.1 ve 3.2.2.'e göre; Enerji üretimi (43 TJ/Gt); Motorin yoğunluk (0,83 kg/lt); Üretilen Enerji Başına Metan Emisyonu (3,9 kg CH<sub>4</sub>/TJ); Üretilen Enerji başına Karbon Emisyon (74100 kg CO<sub>2</sub>/TJ); Metanın CO<sub>2</sub> eşdeğeri (28 t CO<sub>2</sub> eq/t CH<sub>4</sub>); NO<sub>2</sub>'nin CO<sub>2</sub> eşdeğeri (265 t CO<sub>2</sub>/t NO<sub>2</sub>) olarak kabul edilmiştir.

### 2- 1 yıl boyunca işletme ve gerçekleşen dizel yakıt kullanımına göre karbon emisyonları hesaplanması:

Güneş enerjili sistem kurulmadan önce, tur tekneleri turistlerin çevreyi seyretme taleplerini karşılamak amacıyla bazı durumlarda demir atarak bekliyorlar ve bu bekleme sırasında iç hizmetleri karşılamak için tekneyi çalışır durumda tutuyorlardı. Bu işletme şartlarında tekneler sefer başına 18 lt yakıt harcamaktaydılar. Güneş enerjili sistem devreye alındıktan sonra tur tekneleri turistik talepleri karşılarken motor tamamen kapatılmış ve bu durumda sefer başına yaklaşık 3 lt dizel motorin tasarrufu sağlanmıştır. Böylece, sefer başına yaklaşık %16 tasarruf edilmiştir. 1 yıl boyunca ortalama 500 sefer yapan tekne yılda 1500 lt dizel motorin tasarrufu ve dolayısıyla da 4,0281 tCO<sub>2</sub> karbon emisyonu azaltımı yapmıştır. Turizm sezonu düşünüldüğünde, teknelerin Pazar günleri için günde 5 sefer ve diğer günler ise %30 yoğunlukla çalıştıkları varsayımıyla, sezonda 1 tekne 177 sefer ve 40 tekne 7080 sefer yapmaktadır. Böylece turizm sezonu boyunca tüm tekneler, sefer başına 3 lt, toplamda 21.240 lt. tasarruf yapacak ve 57,0382 tCO<sub>2</sub> emisyon azaltımı sağlayacaklardır. Tablo 3'te güneş enerjisi sistemi ile elde edilen yakıt tasarrufu ve emisyon azaltımları gösterilmektedir.

Tasarruf edilen yakıt göz önüne alındığında 1 tekne için 1500 lt. dizel yakıtın su kalitesini bozması önlenmiştir. Bölgedeki 40 teknenin tamamı güneş enerjili sisteme geçiş yaparsa 60.000 lt dizel yakıtın su kalitesini bozması önlenecektir. Ancak, gürültü kirliliği açısından değerlendirildiğinde mevcut sistem gürültü kirliliği açısından herhangi bir değişiklik oluşturmamıştır. Diğer taraftan, tekneler tamamen elektrikli olacak şekilde tasarlanırsa gürültü kirliliği ve tekne civarında bulunan 1200 ppm karbon monoksit tamamen ortadan kalkacaktır. Ayrıca, Birecik Baraj Gölü'nün içme suyu kaynağı olarak korunması ve sürdürülebilir turizm ile bölgenin istihdamının artırılması da gerçekleştirilmiş olacaktır.

**Tablo 3. 1 yıl işletme sonucundaki Emisyon Azaltım Miktarları.**

Tekne Sayısı	Yıllık Tasarruf Edilen Dizel (kg)*	CO <sub>2</sub> Emisyon (ton)*	Metan (CH <sub>4</sub> ) Emisyonu CO <sub>2</sub> eşdeğeri (t CO <sub>2</sub> eq/yıl)*	Azot Dioksit (NO <sub>2</sub> ) CO <sub>2</sub> eşdeğeri (t CO <sub>2</sub> eq/yıl)*	Toplam Emisyon Azaltımı (CO <sub>2</sub> ton/yıl)*
1	1245	3,9669	0,0058	0,0553	4,0281
40	49800	158,6777	0,2338	2,2131	161,1247
Turizm sezonu	21240	56,1719	0,0827	0,7834	57,0382

\* IPCC 2006 kılavuzu Tablo 3.2.1 ve 3.2.2.'e göre; Enerji üretimi (43 TJ/Gt); Motorin yoğunluk (0,83 kg/l); Üretilen Enerji Başına Metan Emisyonu (3,9 kg CH<sub>4</sub>/TJ); Üretilen Enerji başına Karbon Emisyon (74100 kg CO<sub>2</sub>/TJ); Metanın CO<sub>2</sub> eşdeğeri (28 t CO<sub>2</sub> eq/t CH<sub>4</sub>); NO<sub>2</sub>'nun CO<sub>2</sub> eşdeğeri (265 t CO<sub>2</sub>/t NO<sub>2</sub>) olarak kabul edilmiştir.

#### 4. Tartışma

İklim değişikliği ile mücadelede yenilenebilir enerjilerin kullanımı önemli bir yer teşkil etmektedir. Düşük maliyetli yüksek kaliteli güneş enerjili tekneler yenilikçi kavramlar arasında gittikçe artan öneme sahip bir başlıktır. Artan enerji maliyetleri yerel tekne sahiplerini sürdürülebilirlik yönünde düşük maliyetli çözümler bulmaya zorlamaktadır. Rumkale ve Halfeti için günlük hayatta kullanılan ve geçim kaynağı olan tur teknelerinin güneş enerjisi ile çalıştırılması sürdürülebilir ulaşım ve turizm, hava ve su kirliliği, gürültü kirliliği gibi konuların çözümünü sağlayacaktır. Turistik teknelerde kullanılan bağımsız fotovoltaik paneller yenilikçi ve etkin bir çözüm olacaktır.

Bu çalışmadaki yaklaşımla, tur teknelerindeki iç hizmet tüketimleri hesaplanmış ve fotovoltaik sistemden üretilen enerji simüle edilerek enerji kazanımları belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, güneş enerjili tekneler ve bunların fosil yakıt kullanan rakipleri ile aralarındaki enerji kazanımları ve çevresel etkileri hava, su ve gürültü kirliliği açılarından değerlendirilmiş ve elde edilen karbon emisyon azaltımları simülasyon sonuçları ve 1 yıllık işletim sonuçlarına göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre, bölgede çalışan teknelere güneş enerjisi sistemi kurulması durumunda;

Yıllık 1 tekne için 4,0281 ton ve 40 tekne için 161,1247 ton CO<sub>2</sub> emisyon azaltımı,

Yıllık 1 tekne için 1500 lt ve 40 tekne için 60.000 lt dizel yakıt tasarrufu,

Yıllık 1 tekne için 1500 lt ve 40 tekne için 60.000 lt yakıtın içme suyu kaynağının kalitesini bozmasını, sağlanacaktır.

Gaziantep-Rumkale ve Halfeti'de uygulanan güneş enerjili tekne örneğinin sürdürülebilir ulaşım konusundaki pilot çalışmalara öncü olacağı düşünülmektedir. Bu örnek, hassas ekosistemlerdeki ulaşımın çevresel etkilerini azaltarak bölgelerin sürdürülebilirliğini artıracaktır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, teknelerin tamamen elektrikli tekne olarak tasarlanması ve çalıştırılması için gerekli şartlar belirlenmelidir.

#### Teşekkür

Bu çalışmada, AB EuropAid TR2011/0135.15-01/30 sözleşme numaralı ve "AB'nin İklim Değişikliği Politikasının Türkiye'ye Tanıtılması Konusunda Sivil Diyalog" isimli projedeki simülasyon verileri kullanılmıştır. Projenin Lideri Gaziantep İTÜ Mezunları Derneği ve ortakları; Viyana Doğal Kaynaklar ve Yaşam Bilimleri Üniversitesi (BOKU), Gaziantep Hasan Kalyoncu Üniversitesi (HKÜ) ve tbw research GesmbH'dir.

#### Kaynaklar

- [1] United Nations, Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution of the General Assembly. 2015, 70/1  
[https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A\\_RES\\_70\\_1\\_E.pdf](https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf), Erişim tarihi 7 Nisan 2020.
- [2] T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı; Göller ve Sulak Alanlar Eylem Planı 2018-2023, <https://supolitikalaridernegiblog.files.wordpress.com/2018/02/gc3b6ller-ve-sulak-alanlar-eylem-planı.pdf>, Erişim 17 Temmuz 2020.
- [3] Byrnes T.A., & Warnken, J., Greenhouse gas emissions from marine tours: a case study of australian tour boat operators, Journal of Sustainable Tourism, 2006, 14 (3): 255-270, DOI: 10.1080/09669580608669058

- [4] Kokkranikal , J., McLellan, R., & Baum, T., Island tourism and sustainability: a case study of the lakshadweep islands, *Journal of Sustainable Tourism*, 2003, 11(5): 426-447, DOI: 10.1080/09669580308667214.
- [5] Veilleux, G., Potisat, T, Pezim, D., Ribback, C., Ling, J., Krysztofinski, A., Ahmed, A., Papenheim, J., vd., Techno-economic analysis of microgrid projects for rural electrification: A systematic approach to the redesign of Koh Jik offgrid case study, *Energy for Sustainable Development*, 2020, 54: 1-13.
- [6] Fulhu, M., Mohamed, M., ve Krumdieck, S., Voluntary demand participation (vdp) for security of essential energy activities in remote communities with case study in Maldives, *Energy for Sustainable Development*, 2019, 49: 27–38, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.01.002>
- [7] Djorup, S., ZinckThellufsen J., Sorknæs P., The electricity market in a renewable energy system, *Energy*, 2018, 162: 148-157, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.100>
- [8] Bulut, U, Muratoglu, G, Renewable energy in Turkey: great potential, low but increasing utilization, and an empirical analysis on renewable energy-growth nexus. *Energy Policy*, 2018, 123: 240–250.
- [9] Zhao X., Ke Y., Zuo J., Xiong, W., Wu P., Evaluation of sustainable transport research in 2000-2019; *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120404.
- [10] Mills E., Gengnagel T., Wollburg P., Solar-LED Alternatives to fuel-based lighting for night fishing; *Energy for Sustainable Development*, 2014, 21: 30–41
- [11] Spyropoulos V.D., Mitronikas D. E, (2013). A review on the faults of electric machines used in electric ships. *Advances in Power Electronics*, 2013: 1-8, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/216870>
- [12] Aquawatt Tekne Özellikleri, [http://www.aquawatt.at/GB/solarmobilitaet\\_18\\_GB.html](http://www.aquawatt.at/GB/solarmobilitaet_18_GB.html)), Erişim 15 Aralık 2017.
- [13] Solar Water World Tekne Özellikleri, <http://www.solarwaterworld.de/en/products/yacht/suncat-46.html>), Erişim tarihi 15 Aralık 2017.
- [14] Navalt Boats Tekne Özellikleri, <http://www.navaltboats.com/navalt-products-solar-electric-ferry.php> , Erişim tarihi 15 Aralık 2017
- [15] European Commission, DG ENV, Environmental Impacts of Recreational Boating, News Alert Issue 87, 2007 [https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/87na2\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/87na2_en.pdf).
- [16] Moreau, R., Nautical Activities: What Impact On The Environment? A Life Cycle Approach For “Clear Blue” Boating. Commissioned by the European Confederation of Nautical Industries - ECNI ; 2009, [https://www.europeanboatingindustry.eu/images/Documents/For\\_publications/Nautical-activities\\_what-impact-on-the-environment.pdf](https://www.europeanboatingindustry.eu/images/Documents/For_publications/Nautical-activities_what-impact-on-the-environment.pdf), Erişim tarihi 15 Kasım 2017
- [17] İç Sularda Çalışan Gemi ve İç Su Araçları Yönetmeliği; Resmi Gazete Sayısı:27745, Tarih: 31.10.2010, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=14395&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>, Erişim Tarihi 10 Mayıs 2017.
- [18] EU Directive 92/75/EEC; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A31992L0075>, Erişim tarihi 7 Nisan 2017.
- [19] T.C. Sağlık Bakanlığı, Halk Sağlığı Genel Müdürlüğü, Karbon Monoksit Zehirlenmesi, <https://hsgm.saglik.gov.tr/tr/cevresagligi-ced/ced-birimi/karbonmonoksit-zehirlenmesi.html>, Erişim tarihi 7 Nisan 2020.
- [20] US Department of Health and Human Services; Carbon Monoxide emissions and exposure on recreational boats under Various Operational Condition (2003), Report No: EPHB 171-31a; <https://www.cdc.gov/niosh/surveyreports/pdfs/171-31a.pdf?id=10.26613/NIOSHEPHB17131a>, Erişim tarihi 7 Nisan 2020.
- [21] Asplund T.R., The Effects of Motorized Watercraft on Aquatic Ecosystems; Wisconsin Department of Natural Resources, Bureau of Integrated Science Services and University of Wisconsin – Madison, Water Chemistry Program, PUBL-SS-948-00, 2000; [http://www.trpa.org/wp-content/uploads/2010-WI-Dept-of-Natural-Resources\\_UW-Boats-effects-on-ecosystems.pdf](http://www.trpa.org/wp-content/uploads/2010-WI-Dept-of-Natural-Resources_UW-Boats-effects-on-ecosystems.pdf)
- [22] İMEAK (İstanbul, Marmara, Ege, Akdeniz ve Karadeniz) Deniz Ticaret Odası, Sürdürülebilir Denizcilik Uygulamaları Raporu, <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/travelfoundation/wp-content/uploads/2017/12/05092443/Sustainable-Boating-Manual-Turkish.pdf>, 2017, Erişim tarihi 7 Nisan 2020.
- [23] Erbe, C., Marley S.A., Schoeman, R.P., Smith, N.J., Trigg, L.E., Embling, B.C., The effects of ship noise on marine mammals—a review, *Frontiers in Marine Science*, 2019, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00606>
- [24] Ses seviyeleri; <http://www.sesyalitimrehberi.com/teknik-bilgiler.htm>, Erişim tarihi 7 Nisan 2017
- [25] PV\*SOL software; <https://pvsol.software/en/features-pricing>, Erişim tarihi 12 Nisan 2017
- [26] Waldron, C.D., Maurice, L.Q, Kapshe, M., Allyn D.M., Locke, M., Pesmajoglou, S, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; 2006, [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2/V2\\_3\\_Ch3\\_Mobile\\_Combustion.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf) , Erişim tarihi 13 Haziran 2020.
- [27] Türkiye İstatistik Enstitüsü Nüfus Bilgileri; <http://www.turkstat.gov.tr/Start.do?sessionId=NqgDfTnTTDKY6Rg6XbhTBHNgfj8q8mc3Mppb0rLVTTK0QTv7nG4x1-1904474571>, Erişim tarihi 7 Nisan 2020.
- [28] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, Türkiye Işınım Haritası, <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator> , Erişim tarihi 7 Nisan 2017.
- [29] Boote Magazin, Motor gücü ve Hız Grafiği, <https://www.boote-magazin.de/ratgeber/berechnungen.html>. Erişim tarihi 7 Nisan 2017.

## İkili Sözel Gösterim Tabanlı Bilişsel Haritanın Tedarik Zinciri Konfigürasyonunda Kullanımı

Mehtap DURSUN<sup>1\*</sup>, Nazlı GÖKER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi, Galatasaray Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi, Galatasaray Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

\*<sup>1</sup> mdursun@gsu.edu.tr, <sup>2</sup> nagoker@gsu.edu.tr

(Geliş/Received: 27/08/2020;

Kabul/Accepted: 14/10/2020)

**Öz:** Günümüz rekabetçi pazar koşulları ve gelişmiş organizasyonel yapı firmaları tedarik zincirlerini daha verimli bir şekilde tasarlamaya yönlendirmektedir. Tedarik zinciri, artan küresel yetkinlik ve etkinlik kavramları nedeniyle daha önemli hale gelmektedir. Bu nedenle, firmalar için en iyi tedarik zinciri konfigürasyonunu (TZK) bulmak kritik durumdadır. Bu çalışmada riske karşı verilebilecek en uygun reaksiyonu belirlemek için tedarik zinciri yönetimi faktörleri incelenmektedir. İkili sözel gösterim modeli ve sözel hiyerarşiler, karar vericilerden farklı ölçekler kullanılarak elde edilen bilgilerin değerlendirme sürecinde kullanılmıştır. TZK'deki en önemli faktörleri belirlemek için bulanık bilişsel harita (BBH) metodolojisi uygulanmıştır. BBH metodolojisi, faktörler arasındaki sebep-sonuç ilişkilerinden, pozitif ve negatif ilişkilerden ve kesin veri eksikliğinden dolayı uygundur. Uygulama, Türkiye'nin en büyük üreticileri arasında yer alan bir otomobil fabrikasında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Bulanık bilişsel harita, bulanık karar verme, ikili sözel gösterim modeli, sözel hiyerarşiler, tedarik zinciri konfigürasyonu, tedarik zinciri yönetimi

### 2-Tuple Fuzzy Linguistic Representation Model Based Cognitive Map for Supply Chain Configuration

**Abstract:** Today's competitive market conditions and evolved organizational structure compel firms to design their supply chain more efficiently. Supply chain becomes more important because of growing global competence and effectiveness concepts. Therefore, managers endeavor to find best supply chain configuration (SCC) for their firms. This paper investigates the detailed evaluation of supply chain management factors by analyzing relationships and strength of them in order to determine the most appropriate reactions to the risks. 2-tuple linguistic representation model and linguistic hierarchies are used to cope with multi-granular linguistic information. Fuzzy cognitive map (FCM) methodology is employed to determine the most important factors in SCC. FCM methodology is appropriate due to cause-and-effect relationships among factors, positive as well as negative relationships, and the lack of crisp data. The application is conducted in an automobile factory, which is one of the largest manufacturers in Turkey, and the results are analyzed.

**Key words:** Fuzzy cognitive map, fuzzy decision making, linguistic hierarchies, supply chain configuration, supply chain management, 2-tuple linguistic representation model

#### 1. Giriş

Günümüzün rekabetçi iş dünyası, tedarik zinciri yönetimini çok daha karmaşık ve dinamik hale getirmektedir. Bu rekabetçi ortamın yanı sıra, artan belirsizlikler de firmaları ciddi şekilde etkilemekte ve onları tedarik zinciri operasyonları boyunca sürdürülebilir yaklaşımlar geliştirmeye zorlamaktadır. Tedarik zinciri, hammaddelerden başlayarak nihai ürünlere kadar uzanır ve bunların organizasyonel ağ tarafından son tüketiciye teslim edilmesini kapsar ve aynı zamanda tersine lojistik içeren tüm süreçleri barındırır [1].

Tedarik zinciri yönetimi (TZY), planlama, uygulama ve kontrol etme gibi bazı temel aşamalara sahip tüm tedarik zinciri süreçlerinin bütünüdür [2]. Tedarik zinciri artan küresel yetkinlik ve etkinlik kavramı nedeniyle daha önemli hale gelmektedir. Bu nedenle, profesyoneller firmaları için en iyi tedarik zinciri konfigürasyonunu (TZK) bulmaya çalışmaktadır.

Bu çalışma, risklere en uygun reaksiyonları belirlemek için ilişkileri ve bunların gücünü analiz ederek tedarik zinciri yönetimi faktörlerinin ayrıntılı değerlendirmesini incelemektedir. Farklı ölçekler kullanılarak elde edilmiş olan sözel verileri değerlendirmeye katabilmek için ikili sözel gösterim modeli ve sözel hiyerarşiler kullanılmaktadır. Bulanık bilişsel haritalama (BBH) metodolojisi, TZK'deki en önemli faktörleri belirlemek için kullanılmaktadır. BBH metodolojisi, faktörler arasındaki sebep-sonuç ilişkilerinden, olumsuz ve olumlu

\* Sorumlu yazar: mdursun@gsu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-7684-0319, <sup>2</sup> 0000-0003-0820-6989

ilişkilerden ve net veri eksikliğinden dolayı bu çalışma için uygundur. Ayrıca, belirli konsept düğümlerin artış veya azalışının diğer konsept düğümler üzerindeki önem derecesinin etkisini anlamak için üç senaryo analizi uygulanmıştır.

Önerilen yaklaşımın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir. İlk olarak, çalışma risk faktörlerini dikkate alarak TZY ölçütlerini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Dahası, ikili sözel gösterim modeli ve sözel hiyerarşiler farklı ölçeklerde elde edilmiş verilerin ele alınmasını sağlamaktadır. Böylelikle, karar vericilerin değerlendirmelerinde, kişisel deneyim ve görüşlerinden kaynaklanan farklılıklar ve benzerlikler ortaya koyulmakta ve karar vericiler tarafından farklı belirsizlik dereceleri kullanılarak verilen bilgiler karar sürecine dahil edilmektedir. Bununla birlikte, ikili sözel gösterim ve sözel hiyerarşiler, bulanık sözel yaklaşımların kullanılması ile ortaya çıkan veri kaybı sorununu en aza indirmektedir. TZK değerlendirme faktör çiftleri arasındaki kesin sayılar kullanılarak ifade edilemeyen sebep sonuç ilişkileri, BBH kullanılarak değerlendirmeye katılmaktadır. Bu sayede TZK değerlendirme faktörlerinin önem dereceleri bulunmuş olup, bir faktörün önemindeki azalmanın diğer faktörlerin önemi üzerindeki etkisi, çeşitli senaryo analizleri yapılarak tanımlanmıştır. Senaryo analizleri, gelecekte karşılaşılabilecek problemlere proaktif çözüm önerisi geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümü TZK üzerine yapılmış yazın taramasını içermektedir. Üçüncü bölümde ikili sözel gösterim modelini ve sözel hiyerarşileri açıklanmaktadır. Dördüncü bölüm BBH metodolojisini anlatmaktadır. Beşinci bölümde, önerilen yaklaşım verilmektedir. Otomotiv sektöründe gerçekleştirilmiş vaka incelemesi altıncı bölümde gösterilmektedir. Bölüm yedide tartışma ve senaryo analizlerine yer verilmiştir. Son olarak, bölüm sekiz, sonuçları ve gelecek araştırma yönelimlerini sunmaktadır.

## 2. Yazın Taraması

Son yıllarda, bilim adamları TZK için farklı karar verme yaklaşımları geliştirmeye odaklandılar. Beamon ve Fernandes [3] TZK için çok dönemli tamsayı programlama modelini önerdi. Huang ve diğerleri [4], bir dizi platform ürününün konfigürasyonunu ve bir üretici ile birden fazla tedarikçiden oluşan ilgili tedarik zincirinin eniyilemesini üç hamleli dinamik oyun teorisi yaklaşımı önererek sağladı. Akanle ve Zhang [5] TZK'yi müşteri talebi ile belirli bir süre boyunca başa çıkacak şekilde eniyilemek için bir metodoloji önerdi. Önerilen çok ajanlı sistem bir tedarik zincirinde bulunan kaynak seçeneklerinin yanı sıra operasyonel ortamlarda meydana gelen dinamik değişiklikleri modellemek için kullanıldı. Zhang ve Huang [6] platform ürünlerinin ve tedarik zincirlerinin eşzamanlı konfigürasyonu için oyun teorisine dayalı bir yaklaşım önerdi. Ashayeri ve diğerleri [7] tedarik zincirinde partner ve konfigürasyon seçimi için choquet integral tabanlı sezgisel bulanık karar verme yaklaşımı geliştirdi. Amin ve Zhang [8] sökme, yenileme ve bertaraf alanlarını içeren bir genel kapalı döngü tedarik zinciri ağı yapılandırdı. Li ve Womer [9] sipariş üzerine üretim temelli tedarik zincirlerinin konfigürasyonunu hem kaynak bulma hem de planlama kararları açısından eniyilemek için bir karar modeli geliştirdi. Amin ve Zhang [10] genel kapalı döngü tedarik zinciri ağını yapılandırmak için üç aşamalı bir model geliştirdi. İlk aşamada, değerlendirme sürecindeki nitel faktörleri göz önünde bulundurmak için yeni bir kalite fonksiyon yayılımı (QFD) modeli önerildi. İkinci aşamada, genel kapalı döngü tedarik zinciri ağını yapılandırmak için bir stokastik karışık tamsayı doğrusal olmayan programlama modeli önerildi. Üçüncü aşamada, en iyi tedarikçileri seçmek için çok amaçlı bir karma tamsayı doğrusal programlama modeli geliştirildi. Kumar ve Chatterjee [11] ürün hattı seçim kararını TZK'ye entegre etmek için sezgisel bir karar verme yaklaşımı geliştirdi. Mourtzis ve Doukas [12] tabu arama yöntemlerini kullanarak TZK probleminin modellemesini ve çözümünü gerçekleştirdi. Kuang ve diğerleri [13] en düşük toplam tedarik zinciri maliyetine sahip olan TZK'yi bulmak için bir eniyileme problemi formüle etti. Bu problemi çözmek için dinamik programlama tabanlı bir algoritma geliştirdiler. Kisomi ve diğerleri [14] TZK ve tedarikçi seçimini birlikte ele aldı ve bu problem için karma tamsayı doğrusal programlama modeli önerdi. Arashpour ve diğerleri [15] prefabrike ürünlerin gelişmiş imalatında TZK parametrelerinin eniyilemesini gerçekleştirdi. Song ve diğerleri [16] tedarik zinciri ağı tasarımını etkileyen faktörleri içeren bir karar verme modeli önerdi. Srai ve diğerleri [17] kimya sektöründe TZK'yi analiz etmek için bir karar verme modeli sundu. Bu sayede, tedarik ağlarının ekonomik uygulanabilirliğini, çevresel olarak sürdürülebilirliğini ve sosyal açıdan kabul edilebilirliğini etkileyen ölçütleri inceledi. Son zamanlarda, Gaur ve diğerleri [18] yeni ve yeniden yapılandırılmış ürünlerin çok kaynaklı kapalı döngü TZK eniyilemesi için karma tamsayı doğrusal olmayan bir programlama modeli geliştirdi. Dursun and Gumus [19] sezgisel bulanık bilişsel harita yöntemini kullanarak tedarik zinciri konfigürasyon kriterlerini değerlendirmiştir. Zhang ve diğerleri [20] maliyeti ve temin süresini en

küçükleyen çok amaçlı TZK modeli geliştirmiştir. Li ve diğerleri [21] gıda TZK için karma tamsayı doğrusal olmayan programlama modeli geliştirmiştir.

İncelenen çalışmalar TZK yazınına katkıda bulunsa da bunların hiçbiri TZK faktörleri arasındaki nedensel ilişkileri dikkate almamakta ve farklı ölççekler kullanılarak elde edilmiş olan sözel verileri değerlendirmeye katamamaktadır. Halbuki, ölçütler arasında sebep-sonuç ilişkilerinin varlığı çok açıktır. Bu nedenle, TZK faktörleri arasındaki sebep-sonuç ilişkilerini hesaba katan bir analitik tekniğin kullanılması esastır. Dahası, verilerdeki belirsizliğin varlığı ele alınmalıdır. Bu nedenle, bu çalışmada, TZK faktörleri arasındaki sebep-sonuç ilişkilerini değerlendirmek için BBH metodolojisi kullanılmıştır. Bununla birlikte, karar vericilerden elde edilen verinin farklı ölççekler içermesi ikili sözel gösterim modelinin ve sözel hiyerarşilerin kullanımını gerektirmiştir. Son olarak, senaryo analizleri sayesinde belirli bir TZK değerlendirme ölçütünün önem derecesindeki azalış veya artışın diğer ölçütler üzerindeki etkilerinin anlaşılması ve yorumlanması sağlanmıştır.

### 3. İkili Sözel Gösterim ve Sözel Hiyerarşiler

Bu çalışmada Herrera ve Martinez [22]'in önermiş olduğu ikili sözel gösterim yaklaşımı ve Cordon ve diğerleri [23] tarafından ortaya konmuş olan sözel hiyerarşiler kullanılmaktadır. İkili sözel gösterim yaklaşımı sözel değişkenler kullanılarak ifade edilmiş verinin  $(s_i, \alpha)$  şeklinde ikili gösterim ile ifade edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu ifadede  $s_i$ , tanımlanmış temel sözel terim kümesini,  $S_T$ , sözel etiketini ve  $\alpha$  sayısal değeri göstermektedir [24].

**Tanım 1 [25]:**  $L = (\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_g)$ ,  $S_T$ 'de belirlenmiş bir bulanık küme olmak üzere  $L$ 'yi  $[0, g]$  aralığında sayısal bir değere dönüştürecek olan fonksiyon

$$\begin{aligned} \chi: F(S_T) &\rightarrow [0, g], \\ \chi(F(S_T)) &= \chi(\{(s_j, \gamma_j), j = 0, 1, \dots, g\}) = \frac{\sum_0^g j\gamma_j}{\sum_0^g \gamma_j} = \beta \end{aligned} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanır. Tanımda  $F(S_T)$   $S_T$ 'de tanımlı bir bulanık kümedir.

**Tanım 2 [22]:**  $S = (s_0, s_1, \dots, s_g)$ , bir sözel terim kümesi ve  $\beta \in [0, g]$  sembolik birleştirme işleminin sonucunu gösteren değer olmak üzere,  $\beta$ 'nın ikili sözel gösterimi

$$\begin{aligned} \Delta: [0, g] &\rightarrow S \times [-0.5, 0.5], \\ \Delta(\beta) &= \begin{cases} s_i, & i = \text{round}(\beta) \\ \alpha = \beta - i, & \alpha \in [-0.5, 0.5] \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

olarak hesaplanır.

**Önerme 1 [26]:**  $S = (s_0, s_1, \dots, s_g)$ , bir sözel terim kümesi ve  $(s_i, \alpha)$  ikili gösterim olsun. İkili gösterimden eşdeğeri sayısal  $\beta \in [0, g] \subset \mathfrak{R}$ . değerine dönmek için  $\Delta^{-1}$  fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu fonksiyon

$$\begin{aligned} \Delta^{-1}: S \times [-0.5, 0.5] &\rightarrow [0, g], \\ \Delta^{-1}(s_i, \alpha) &= i + \alpha = \beta \end{aligned} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir.

Sözel hiyerarşiler sözel kuralların hiyerarşik sistemini tasarlamak için geliştirilmiştir.  $l(t, n(t))$  sözel hiyerarşi seviyesini ifade etmek üzere  $t$  hiyerarşinin seviyesini,  $n(t)$  ise sözel değişken kümesinin belirsizlik derecesini belirtmektedir [23].  $t+1$  seviyesindeki sözel terimler kümesi  $t$  seviyesinden Denklem (4) kullanılarak elde edilmektedir.

$$L(t, n(t)) \rightarrow L(t + 1, 2 \cdot n(t) - 1) \quad (4)$$

Hiyerarşide sözel terimler arasındaki dönüşüm Denklem (5) kullanılarak tanımlanmaktadır [23]:

$$TF_t^t: l(t, n(t)) \rightarrow l(t', n(t')) \quad (5)$$

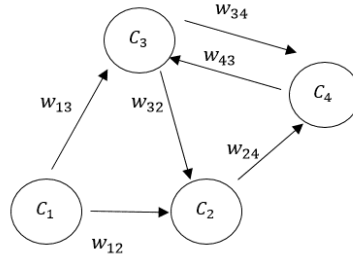
$$TF_{t'}^t(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) = \Delta \left( \frac{\Delta^{-1}(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)})(n(t') - 1)}{n(t) - 1} \right)$$

#### 4. Bulanık Bilişsel Haritalama

BBH, karar problemindeki faktörlerin etkilerini belirlemek için konseptler arasındaki sebep-sonuç ilişkilerini göz önünde bulunduran bir araçtır. Çok ölçütlü karar verme problemleri için pratik bir yöntemdir. Genel olarak, BBH'nin oluşturulması nedenselliğe dayanmaktadır. BBH yöntemi, bulanık mantık ve sinir ağlarını birleştiren bir sistem niteliğindedir [27].

BBH, konsept düğümlerini, ağırlıklandırılmış okları, ve aynı zamanda geri bildirimleri içeren grafiksel gösterimdir. Ağırlıklandırılmış oklar, konseptler arasındaki ilişkileri nedensellik yönüyle temsil etmekte; nedensel ilişkinin var olup olmadığını, var ise pozitif veya negatif olduğunu göstermekte, ve konseptler arasındaki nedensel ilişkilerin üretildiği düğümleri birbirine bağlamaktadır [28].

$C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ , genellikle bir durum, değişken, olay, eylem, amaç, değer veya sistemlerin diğer bir unsurunu temsil eden kavram kümelerinin temsidir. Oklar,  $C_j$  konseptinin  $C_i$  konseptine ne kadar etki ettiğini göstermektedir. Sebep-sonuç ilişkilerinin önem değeri  $[-1,1]$  aralığında yer almakta ve “negatif olarak zayıf”, “sıfır”, “pozitif olarak çok güçlü” gibi sözel değişkenlerle gösterilmektedir. Şekil 1’de, bir BBH'nin grafiksel gösterimi verilmektedir.



Şekil 1. BBH'nin grafiksel gösterimi

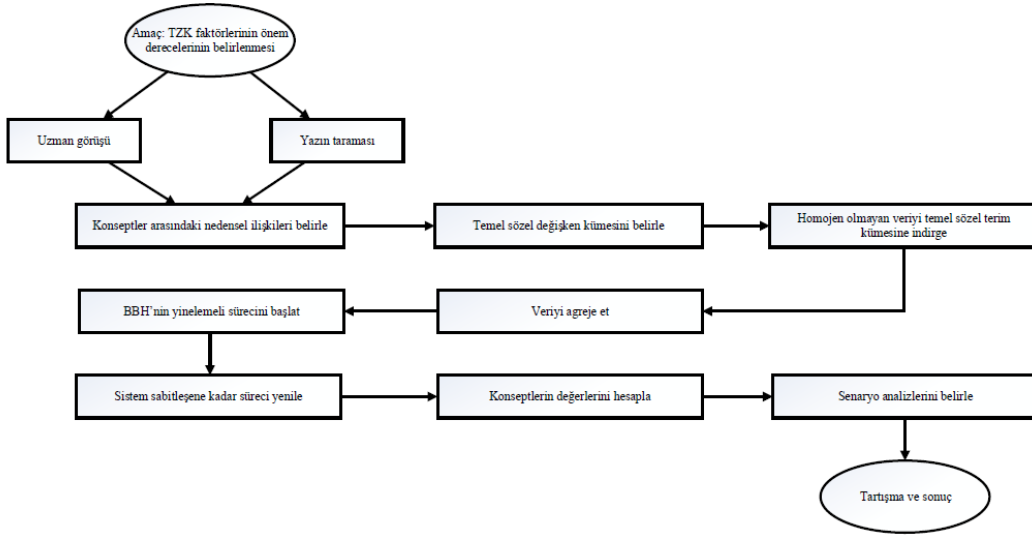
$w_{ji}$ 'nin işareti konseptler arasındaki sebep-sonuç ilişkilerinin yönünü göstermektedir. Eğer  $w_{ji} > 0$  ise, pozitif bir sebep-sonuç ilişkisi vardır, eğer  $w_{ji} < 0$  ise,  $C_j$  ve  $C_i$  kavramları arasında negatif bir sebep-sonuç ilişkisi vardır. Ayrıca  $w_{ji} = 0$  ise, ilgili kavramlar arasında nedensellik ilişkisi yoktur. Bu nedensel ilişkilerin gücünü belirlemek için ise  $w_{ji}$  ağırlığına bir değer verilmelidir. Örneğin, Şekil 1’de,  $C_2$  konsepti  $C_3$ 'te  $w_{32}$  derecesinde bir artışa veya azalmaya neden olmaktadır. Her bir konseptin değeri aşağıda verilen iteratif denklem çalıştırılarak hesaplanır.

$$A_i^{(k+1)} = f \left( A_i^{(k)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N A_j^{(k)} w_{ji} \right) \quad (6)$$

$C_i$  konseptinin  $k$ . iterasyondaki değerini ifade etmektedir,  $w_{ij}$ ,  $C_j$  ve  $C_i$  konseptleri arasındaki nedensel ilişkinin gücünü göstermektedir ve  $f$  bir eşik fonksiyonudur. Tüm konseptlerin aktivasyon seviyeleri, BBH'de senkronize olarak güncellenmektedir.  $A^t = [A_1^t, A_2^t, \dots, A_n^t]$  vektörü BBH'nin  $t$  adımındaki durumunu göstermektedir ve  $n$ , konseptlerin sayısıdır. Her konseptin bir iterasyon sonundaki değeri, aynı konseptin bir sonraki iterasyondaki değerine eşittir. BBH modellemesinin temel amacı, her bir konseptin önem derecesini veren son vektörü belirlemektir [28].

#### 5. Önerilen Karar Verme Yöntemi

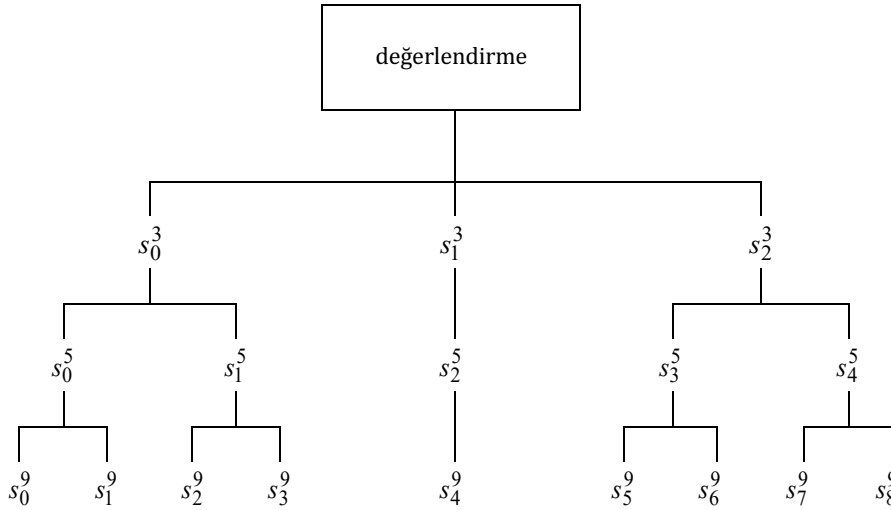
Geliştirilen yaklaşım aşağıda özetlenmekte ve Şekil 2’de gösterilmektedir.



Şekil 2. Önerilen karar verme algoritması

**Adım 1.** Konseptler, uzman görüşleri ve yazın taraması sonucunda belirlenir.

**Adım 2.** Karar vericiler konseptler arasında var olan ilişkinin derecelerini Şekil 3'te verilmiş olan  $LH = U_t I(1,3)$  sözel hiyerarşileri kullanarak ifade eder.



Şekil 3. Sözel hiyerarşi  $LH = U_t I(1,3)$  [29].

**Adım 3.** Karar vericilerden farklı ölçeklerde elde edilmiş olan verileri birleştirmek için bir temel sözel değişken kümesi belirlenir ve homojen olmayan veriler Denklem (5) kullanılarak temel sözel terim kümesine indirgenir.

**Adım 4.** Aritmetik ortalama kullanılarak temel sözel terim kümesine indirgenmiş veriler birleştirilir.

**Adım 5.** BBH'nin yinelemeli süreci  $A^0 = [1,1,\dots,1]$  başlangıç vektörünü kullanarak başlatılır [28].

**Adım 6.** Başlangıç vektörü değeri Denklem (6) kullanılarak güncellenir. Sigmoid fonksiyonu konsept değerlerinin  $[0,1]$  aralığında sınırlandırılması için uygun bir fonksiyondur.

**Adım 7.** Konsept değerleri Denklem (6) kullanılarak hesaplanır.

**Adım 8.** Senaryo analizleri gerçekleştirilir.



## 6. Vaka çalışması

Vaka çalışması, Türkiye'nin en büyük otomobil üreticilerinden birinde gerçekleştirilmiştir. Tedarik zinciri konfigürasyonu oluşturmanın ilk adımı konseptlerin belirlenmesidir. Bu çalışmanın asıl amacı, karar vericilerin tedarik zincirini dinamik olarak kontrol etmelerine ve parametrelerin ilişkilerine göre eylemde bulunmalarına yardımcı olacak en iyi tedarik zinciri konfigürasyonunu belirlemektir.

Modelimiz Tablo 1'de gösterilmiş olan 13 konsepti içermektedir.

**Tablo 1.** TZK konseptleri

	Konsept
C <sub>1</sub>	Tedarikçi entegrasyonu
C <sub>2</sub>	İç entegrasyon
C <sub>3</sub>	Müşteri entegrasyonu
C <sub>4</sub>	Teslim
C <sub>5</sub>	Kalite
C <sub>6</sub>	Esneklik
C <sub>7</sub>	Maliyet
C <sub>8</sub>	Yalın
C <sub>9</sub>	Çevik
C <sub>10</sub>	Talep ve tedarik belirsizliği
C <sub>11</sub>	Düşük duyarlılık performansı
C <sub>12</sub>	İşyerinde düşük kalite veya süreç verimi
C <sub>13</sub>	Uygun tedarikçi seçimi

Yazın araştırması ve uzmanların bilgisi ile belirlenmiş olan TZK modeli, tedarik zinciri yönetimi hakkında sağlam bir geçmişe ve derin bilgiye sahip üç uzman tarafından analiz edilmiştir. Uzmanlar bir konseptin diğeri üzerindeki etkisini belirtirler. Başlangıçta, her bir konsept çifti arasında nedensel bir ilişki olup olmadığını belirtirler. İlişki yoksa, ilgili konsept çiftini atlarlar, ancak nedensel bir bağlantı varsa, Şekil 3'te verilen sözel hiyerarşileri kullanarak ilişkinin gücünü gösterirler. Uzmanların değerlendirmesi Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Uzman görüşlerine göre faktörler arasındaki ilişkilerin gücü

	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>
C <sub>1</sub>	-	-	(s <sub>1</sub> <sup>5</sup> , s <sub>0</sub> <sup>3</sup> , s <sub>2</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>5</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )	-	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )
C <sub>2</sub>	(s <sub>1</sub> <sup>5</sup> , s <sub>0</sub> <sup>3</sup> , s <sub>2</sub> <sup>9</sup> )	-	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>0</sub> <sup>3</sup> , s <sub>3</sub> <sup>9</sup> )	-	(s <sub>1</sub> <sup>5</sup> , s <sub>0</sub> <sup>3</sup> , s <sub>3</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>0</sub> <sup>3</sup> , s <sub>2</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	-	-
C <sub>3</sub>	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>1</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>3</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-
C <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C <sub>5</sub>	-	-	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>3</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )
C <sub>6</sub>	-	-	-	-	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )
C <sub>7</sub>	-	-	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-
C <sub>8</sub>	-	-	-	-	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	-
C <sub>9</sub>	-	-	-	-	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )
C <sub>10</sub>	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	-	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>4</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )	-	-
C <sub>11</sub>	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>5</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>0</sub> <sup>3</sup> , s <sub>3</sub> <sup>9</sup> )	-	-	-
C <sub>12</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>8</sub> <sup>9</sup> )
C <sub>13</sub>	-	-	-	(s <sub>2</sub> <sup>5</sup> , s <sub>0</sub> <sup>3</sup> , s <sub>3</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>4</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>1</sub> <sup>5</sup> , s <sub>1</sub> <sup>3</sup> , s <sub>4</sub> <sup>9</sup> )	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>7</sub> <sup>9</sup> )	-	-	(s <sub>3</sub> <sup>5</sup> , s <sub>2</sub> <sup>3</sup> , s <sub>6</sub> <sup>9</sup> )	-

Farklı ölçeklerden elde edilmiş verileri birleştirmek için I(2,5) temel sözel terim kümesi olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te gösterilmektedir.

**Tablo 3.** İlişkilerin birleştirilmiş gücü

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$
$C_1$	-	$(s_1^5, -0.33)$	$(s_2^5, 0.17)$	$(s_4^5, 0)$	$(s_4^5, 0)$	-	$(s_3^5, -0.33)$	$(s_3^5, 0.33)$	-	$(s_4^5, -0.17)$	-	$(s_4^5, -0.33)$
$C_2$	$(s_1^5, -0.33)$	-	$(s_1^5, 0.17)$	-	$(s_1^5, -0.17)$	-	$(s_1^5, 0)$	-	-	-	-	-
$C_3$	$(s_4^5, -0.33)$	-	-	$(s_2^5, 0.33)$	-	-	$(s_2^5, -0.5)$	-	$(s_4^5, -0.33)$	-	-	-
$C_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$C_5$	-	-	$(s_2^5, -0.17)$	-	-	-	$(s_4^5, 0)$	-	-	$(s_4^5, -0.5)$	$(s_4^5, 0)$	$(s_4^5, -0.33)$
$C_6$	-	-	-	-	-	-	$(s_3^5, -0.33)$	$(s_4^5, -0.17)$	-	-	-	$(s_4^5, -0.33)$
$C_7$	-	-	-	-	$(s_3^5, 0.33)$	-	-	-	$(s_4^5, -0.5)$	-	-	-
$C_8$	-	-	-	-	$(s_4^5, -0.17)$	-	-	$(s_4^5, -0.5)$	-	-	$(s_3^5, 0.33)$	-
$C_9$	-	-	-	-	$(s_4^5, -0.17)$	$(s_4^5, 0)$	-	$(s_4^5, -0.33)$	-	$(s_4^5, -0.5)$	$(s_4^5, -0.17)$	$(s_4^5, -0.5)$
$C_{10}$	$(s_4^5, -0.17)$	-	-	-	-	$(s_1^5, 0)$	$(s_4^5, -0.5)$	-	-	$(s_4^5, 0)$	-	-
$C_{11}$	$(s_3^5, -0.5)$	$(s_3^5, 0.33)$	$(s_4^5, -0.5)$	-	-	$(s_3^5, -0.17)$	-	-	$(s_1^5, 0.17)$	-	-	-
$C_{12}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	$(s_4^5, -0.33)$
$C_{13}$	-	-	-	$(s_1^5, 0.17)$	$(s_4^5, -0.33)$	$(s_3^5, 0.33)$	$(s_4^5, -0.17)$	$(s_2^5, -0.33)$	$(s_4^5, -0.5)$	-	$(s_4^5, -0.33)$	-

Konsept değerlerini hesaplamak için Denklem (6)'nın iteratif süreci,  $A^0 = [1, 1, \dots, 1]$  başlangıç vektörü kullanılarak başlatılmıştır. 100'den fazla iterasyondan sonra sistem dengeye ulaşmış ve TZK konsept değerleri Tablo 4'te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

**Tablo 4.** TZK konseptlerinin değerleri

	Konsept değerleri
$C_1$	0.9488
$C_2$	0.8122
$C_3$	0.9064
$C_4$	0.8948
$C_5$	0.9914
$C_6$	0.9766
$C_7$	0.9590
$C_8$	0.9794
$C_9$	0.9767
$C_{10}$	0.9233
$C_{11}$	0.9786
$C_{12}$	0.9802
$C_{13}$	0.9893

Tablo 4, “kalite”, “uygun tedarikçi seçimi” ve “işyerinde düşük kalite veya süreç verimi”nin en önemli üç risk faktörü olduğunu göstermektedir. Firmalar genellikle performanslarını finansla performans (yatırım kar oranı, pazar payı, brüt kar, vs.) ve operasyonel performans olmak üzere 2 kategoride ölçümlenmektedir. “Kalite”, “uygun tedarikçi seçimi” ve “işyerinde düşük kalite veya süreç verimi” faktörleri en önemli operasyonel performans göstergeleri arasındadır. Çalışmanın sonunda bu üç faktörün en önemli risk faktörleri olarak sıralanması uygulanan yöntemin sonuçlarının tutarlılığını ortaya koymaktadır.

## 7. Tartışma ve Senaryo Analizleri

Teknolojik gelişmeler, hızlı değişen pazar koşulları ve müşterilerin artan gereksinimleri, firmaları rekabet avantajlarını korumak için güçlüklerle başa çıkmaya zorlamaktadır. Firmalar, performanslarını genellikle işletme performansı (yatırım getirisi, pazar payı, satış getirisi vb.) ve operasyonel performans (esneklik, maliyet, teslimat, kalite vb.) adı verilen iki kategoride ölçmektedir. Bunlar sistemin etkinliğini değerlendirmek için önemli

çıktıdır; bununla birlikte operasyonel performans ölçütleri, işletme performans ölçütlerinin bir girdisi olarak önemli bir rol oynamaktadır. TZY, operasyonların stratejik bir bileşenidir, verimli konfigürasyon, firmanın birçok avantajının yanı sıra, potansiyel dezavantajlara da sebep olabilmektedir.

Esneklik ve çeviklik, artan beklentilere, farklılaştırılmış gereksinimler ve belirsizlikler ile başa çıkmak için iki anahtar terimdir. Bu kavramların önemini azalttığımızda, yalın konseptinin, düşük kalite veya süreç verimliliğinin, ve uygun tedarikçi seçiminin etkisi çarpıcı biçimde azalmaktadır. Bununla birlikte, kalite ve düşük duyarlılık performansı biraz azalmaktadır.

Daha düşük duyarlılık performansı ve işyerinde düşük kalite veya süreç verimi, operasyonel etkinlik sağlanarak azalabilen risk faktörleridir. Bu risk faktörlerinin önem değerlerinin sıfıra eşit olduğu durumda, çevresel belirsizliklerin etkileri etkin bir şekilde değerlendirilmektedir. Kalite, yalın ve çevik kavramlar dışındaki tüm kavramlar olumsuz yönde değişirken, iç entegrasyon dramatik biçimde azalmaktadır.

En önemli TZE kavramı olan uygun tedarikçi seçiminin önem derecesi azalır, tüm kavramlar olumsuz yönde etkilenmektedir. Ancak, teslim ve esneklik kavramlarının önem dereceleri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu değişim tüm risk faktörlerinin önemini azaltmaktadır, çünkü bu faktör tedarik zincirinin sürdürülebilirliği için hayati bir ölçüttür. Çevik ve yalın konsept değerlerinin önemi azalmaktadır. Esnekliğin çeviklikle benzer dinamikleri vardır ve esnekliğin öneminin azalması bizim için beklenen bir sonuçtur.

## 8. Sonuç

Bu çalışmada hem literatür taraması hem de uzman bilgisi kullanılarak TZK faktörleri belirlenmiştir. Belirlenen konseptler arasında nedensellik ilişkisi olup olmadığına uzmanlar tarafından karar verilmiştir. Her bir konsept çifti arasında nedensellik varsa, uzmanlar ilişkinin gücünü belirlemişlerdir. Uzmanlar tarafından farklı ölçekler kullanılarak belirlenen veriler ikili sözel gösterim modeli ve sözel hiyerarşiler kullanılarak birleştirilmiştir. Daha sonra, BBH metodolojisi kullanılarak her bir konseptin önem derecesi hesaplanmıştır. Kullanılan FCMapper yazılımının sonucuna göre, kalite, uygun tedarikçi seçimi ve işyerinde düşük kalite veya süreç verimi en güçlü üç faktör olarak tespit edilmiştir. Son olarak, belirli konsept(ler)in gücünün azalmasının diğer konseptler üzerindeki etkisini anlamak için üç farklı senaryo analizi yapılmıştır. Önerilen yaklaşımın avantajları şu şekilde sıralanabilir.

- Bu çalışma, risk faktörlerini dikkate alarak temel TZK ölçütlerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır.
- Homojen olmayan verilerin karar verme sürecine veri kaybı olmaksızın dahil edilmesi ikili sözel gösterim modeli ve sözel hiyerarşiler kullanılarak sağlamaktadır.
- TZK değerlendirme faktörleri arasındaki nedensel ilişkileri belirlemek için BBH kullanılmaktadır.
- Bir faktörün önem derecesindeki azalmanın, diğer faktörlerin gücüne etkisi, senaryo analizi yapılarak belirlenmektedir.

Önerilen yaklaşım faktörler arasında var olabilecek negatif yönlü sebep sonuç ilişkilerini göz ardı etmektedir. Gelecekteki çalışmalarda negatif yönlü ilişkilerin de değerlendirmeye katılması ve buna uygun BBH eşik fonksiyonunun kullanılması planlanmaktadır. Ayrıca, sektörlere göre değişebilen farklı TZK faktörlerinin çalışmaya dahil edilmesi öngörülmektedir. Bunun yanı sıra veri alınan uzman sayısının artırılması da hedeflenmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışmanın değerlendirme ölçütleri Doç. Dr. Mehtap Dursun danışmanlığında Güray Gümüş tarafından yazılan tezden alınmıştır.

Bu çalışma Galatasaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (Proje No: FBA-2020-1024) tarafından desteklenmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Iansiti M, Levien R. Strategy as ecology. Harvard Business Review 2004; 82(3), 68-81.
- [2] Park JH, Lee JK, Yoo JS. A framework for designing the balanced supply chain scorecard. European Journal of Information Systems 2005; 14, 335-346.
- [3] Beamon BM, Fernandes C. Supply-chain network configuration for product recovery. Production Planning & Control 2004; 15(3), 270-281.
- [4] Huang GQ, Zhang XY, Lo VHY. Integrated configuration of platform products and supply chains for mass customization: A game theoretic approach. IEEE Transactions on Engineering Management 2007; 54(1), 156-171.
- [5] Akanle OM, Zhang DZ. Agent-based model for optimising supply-chain configurations. International Journal of Production Economics 2008; 115(2), 444-460.

- [6] Zhang X, Huang GQ. Game-theoretic approach to simultaneous configuration of platform products and supply chains with one manufacturing firm and multiple cooperative suppliers. *International Journal of Production Economics* 2010; 124(1), 121-136.
- [7] Ashayeri J, Tuzkaya G, Tuzkaya UR. Supply chain partners and configuration selection: an intuitionistic fuzzy choquet integral operator based approach. *Expert Systems with Applications* 2012; 39(3), 3642-3649.
- [8] Amin SH, Zhang G. An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: multi-objective approach. *Expert Systems with Applications* 2012; 39(8), 6782-6791.
- [9] Li H, Womer K. Optimizing the supply chain configuration for make-to-order manufacturing. *European Journal of Operational Research* 2012; 221(1), 118-128.
- [10] Amin SH, Zhang G. A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty. *International Journal of Production Research* 2013; 51(5), 1405-1425.
- [11] Kumar S, Chatterjee AK. A heuristic-based approach to integrate the product line selection decision to the supply chain configuration. *International Journal of Production Research* 2013; 51(8), 2399-2413.
- [12] Mourtzis D, Doukas M. On the configuration of supply chains for assemble-to-order products: case studies from the automotive and the CNC machine building sectors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 2015; 36, 13-24.
- [13] Kuang H, Hu SJ, Ko J. Concurrent design of assembly plans and supply chain configurations using and/or graphs and dynamic programming. *Journal of Manufacturing Science & Engineering-ASME* 2016; 138(5), 051011.
- [14] Kisomi MS, Solimanpur M, Doniavi A. An integrated supply chain configuration model and procurement management under uncertainty: A set-based robust optimization methodology. *Applied Mathematical Modelling* 2016; 40(17-18), 7928-7947.
- [15] Arashpour M, Bai Y, Aranda-mena G, et al. Optimizing decisions in advanced manufacturing of prefabricated products: theorizing supply chain configurations in off-site construction. *Auto Construct* 2017; 84, 146-153.
- [16] Song G, Sun L, Wang Y. A decision-making model to support the design of a strategic supply chain configuration. *Journal of Manufacturing Technology Management* 2018; 29(3), 515-532.
- [17] Srai JS, Tsolakis N, Kumar M, et al. Circular supply chains and renewable chemical feedstocks: A network configuration analysis framework. *Production Planning & Control* 2018; 29(6), 464-482.
- [18] Gaur J, Amini M, Rao AK. The impact of supply chain disruption on the closed-loop supply chain configuration profit: a study of sourcing policies. *International Journal of Production Research* 2020; 58(17), 5380-5400.
- [19] Dursun M, Gumus G. Intuitionistic fuzzy cognitive map approach for the evaluation of supply chain configuration criteria. *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 2020; 43(13), 7788-7801.
- [20] Zhang X, Zhan ZH, Zhang J. A fast efficient local search-based algorithm for multi-objective supply chain configuration problem. *IEEE Access* 2020; 8, 62924-62931.
- [21] Li H, Li D, Jiang D. Optimising the configuration of food supply chains. *International Journal of Production Research* 2020; <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1751337>.
- [22] Herrera F, Martínez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2000; 8(6), 746-752.
- [23] Cordon O, Herrera F, Zwir I. Linguistic modeling by hierarchical systems of linguistic rules. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2002; 10(1), 2-20.
- [24] Dursun M. Atık su yönetimi için bütünlük bulanık çok ölçütlü karar verme yöntemi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2018; 30(1), 209-217.
- [25] Herrera F, Martínez L. An approach for combining linguistic and numerical information based on 2-tuple fuzzy representation model in decision-making. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems* 2000; 8(5), 539-562.
- [26] Herrera-Viedma E, Herrera F, Martínez L, Herrera JC, López AG. Incorporating filtering techniques in a fuzzy linguistic multi-agent model for information gathering on the web. *Fuzzy Sets and Systems* 2004; 148(1), 61-83.
- [27] Kosko B. Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies* 1986; 24, 65-75.
- [28] Büyükavcu A, Albayrak YE, Göker N. A fuzzy information-based approach for breast cancer risk factors assessment. *Applied Soft Computing* 2016; 38, 437-452.
- [29] Huynh VN, Nakamori Y. A satisfactory-oriented approach to multiexpert decision-making with linguistic assessments. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics* 2005; 35(2), 184-196.



## Farklı Parametreler Işığında Fiber/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Mukavemet Özelliklerinin Deneysel Olarak Değerlendirilmesi

Ercüment Uğur Yüncüoğlu<sup>1</sup>, Serdar Turgut İnce<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Bölümü, İstanbul, Türkiye, 34349

\*serince@outlook.com

(Geliş/Received: 03/09/2020;

Kabul/Accepted: 29/12/2020)

**Öz:** Mühendislik yapılarında fiber/epoksi kompozitler, dayanıklılık ve hafifliği nedeniyle yaygınca kullanılmaktadır. Tasarımcılar açısından kompozit malzemenin seçimi için fiber tipi, katman sayısı, yüklemeye maruz kalacağı açı, yükleme hızı gibi çeşitli durumlarda malzemenin mukavemetinin nasıl değiştiği önemlidir. Bu çalışmada, bu parametreler ışığında tam faktöriyel bir deney tasarımı kurulmuş ve parametrelerin birbirleri üzerindeki çapraz etkileri; maksimum çekme gerilmesi, birim şekil değiştirme ve yapı tarafından depo edilen enerji açısından değerlendirilerek tasarımcılar için kullanışlı sonuçlar ve gözlemler elde edilmiştir. Fiberlerin yönelim açısı mukavemet üzerinde çok etkili olsa da; değişik kalınlıklarda, hızlarda ve fiber tiplerinde farklı oranlarda mukavemeti değiştirmektedir. Bu açıdan bahsedilen parametrelerin birbirlerini çapraz olarak etkilediği söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** Fiber/epoksi, kompozit malzeme, malzeme mukavemeti, deneysel çalışma,

### Experimental Evaluation of Strength Properties of Fiber/Epoxy Laminated Composites in the Light of Different Parameters

**Abstract:** Fiber/epoxy composites are widely used in engineering structures due to their durability and lightness. How the strength of the material changes in various situations such as the fiber type, the number of layers, the angle it will be subjected to loading, the loading rate is important for the designers to choose the composite material. In this study, a full factorial experimental design was established in the light of these parameters and the cross effects of the parameters on each other were evaluated in terms of tensile stress, strain and absorbed energy, and useful results and observations were obtained for designers. Although the orientation angle of the fibers is very effective on the strength, it changes the strength differently at various thicknesses, different speeds and fiber types. In this respect, it can be stated that the parameters affect each other.

**Key words:** Fiber/epoxy, composite material, material strength of materials, experimental study

#### 1. Giriş

Makine, gemi, uçak ve inşaat mühendisliği gibi çok çeşitli mühendislik dallarında tabakalı fiber/epoksi kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, birçok mekanik ve fiziksel özellikleri sebebiyle metallere göre tercih edilmektedir. Tasarımcılar açısından tabakalı fiber/epoksi kompozit malzemelerin seçiminde malzeme mukavemeti için belirlenmesi gereken birçok parametre söz konusudur. Bunlar malzemenin kullanım amacı ve kullanımı sırasında maruz kalacağı yükleme durumlarıyla alakalıdır. Bu parametrelerin en önemlileri fiber tipi, fiber yönü, katman sayısı, maruz kalabileceği yükleme hızı ve fiber yoğunluğu olarak sıralanabilir [1].

Fiber tipi olarak karbon fiber/epoksiler, cam fiber/epoksilere göre daha iyi bir performans gösterirler [2]. Yapı üzerine gelen kuvvet doğrultusunda seçilen fiber yönü ile kompozit malzeme en yüksek dayanımı gösterir ve yük doğrultusuyla yapılan açı ile malzemenin mukavemeti düşer [1-5]. Birim şekil değiştirmeler açısından en az uzama, fiber yönü ile yük yönünün aynı seçilmesi durumunda gerçekleşir [1]. Fiber yönündeki çekmelerde gevrek davranış gözlemlenir. En sünek davranış [45/-45]<sub>w</sub> oryantasyonunda görülür [1, 6]. Böylece ara açılarda gevrekten süneğe doğru bir davranış değişimi gözlenir.

Kompozit yapının elastisite modülü kalınlık azaldıkça artar. Katman sayısı arttıkça çekme dayanımı düşer ama çekme yönünde daha fazla uzama görülür [3]. Ayrıca katman sayısının artmasıyla çekme dayanımı artmaktadır [7]. Ancak bu artış miktarı sınırlıdır [8].

Yüklemeye hızının elastisite modülü üzerindeki etkisi oldukça sınırlıdır [9]. Maksimum çekme gerilmesi üzerinde ise etkilidir ve çekme hızının artmasıyla çekme gerilmesi de artar [10]. Fiberler ile matris arasında, çekme hızının artmasıyla daha sünek bir davranış gözlemlenir [11]. Diğer yandan kopma şekli değiştirmesi sünek

davranış artkça artar. Bu sebeple kompozit malzemelerin çekme sırasında malzeme içinde depoladıkları enerjiyi incelemek gerekir [12]. Bir çalışmaya göre  $[15/-75]_w$  oryantasyondaki fiber/epoksi malzeme en yüksek enerji emiliminin gerçekleştiği açıdır [13]. Yüksek hızlarda yapılan testlerde, düşük hızlara göre %50 oranında daha fazla enerji emildiğini bulunmuştur [14]. Öte yandan sıcaklık da malzeme davranışını etkilemektedir. 0 derecenin altında karbon fiber/epoksilerde malzemenin kırılma tokluğu azalmaktadır [15].

Görüldüğü üzere literatürde parça parça yapılmış çalışmalardan bir takım çıkarımlar yapılsa da gerek deney ekipmanlarının ve deney amaçlarının farklılığı gerekse deneyde değiştirilen parametrelerin çapraz etkileri sebebiyle tasarımcılar açısından bu veriler yeterli değildir. Parametrelerin daha geniş bir perspektiften birbirleri ile olan etkilerini de içerecek şekilde değerlendirilmesinin daha kullanışlı ve anlamlı olacağı düşünülmüştür. Cam ve karbon fiberler 2 farklı hızda, 2 farklı kalınlıkta ve 4 farklı oryantasyon açısından incelenmiştir. Bu çalışmada tam faktöriyel deney tasarımıyla 24 farklı test gerçekleştirilmiş ve ölçülen parametrelerin birbirleri ile olan etkileri dâhil birçok sonuç, aynı test ekipmanlarıyla yapılmıştır. Parametrelerin etkisinin daha net anlaşılabilmesi ve kıyaslanabilmesi amacıyla elde edilen sonuçlar mümkün olan en az grafikte ifade edilmeye çalışılmıştır. Böylece tasarımcılar için kompozit malzeme seçiminde kullanışlı olabilecek sonuçlar görselleştirilmiş ve değerlendirilmiştir.

## 2. Deneysel Metot

Fiber/epoksi kompozit malzemelerle, 4 faktörlü; 2 (fiber tipi), 2 (çekme hızı), 2 (katman) ve 4 (oryantasyon) seviyeli; 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilen toplam 72 çekme testi yapılmıştır. Numunelerin hazırlanması için ilk olarak vakum infüzyon yöntemi ile 650 x 650 mm boyutlarında cam fiber takviyeli epoksi (CFTE) ve karbon fiber takviyeli epoksi (KFTE) kompozit plakalar üretilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi 1 atm basınç altında gerçekleştirilmiştir. KFTE ve CFTE kompozit plakalarının üretiminde aynı reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin matrisini oluşturan epoksi için reçine olarak Araldite LY 1564 ve sertleştirici olarak Aradur 3487 kullanılmıştır. Reçine ve sertleştiricinin kütlece karışım oranı 100/34' tür. Her bir plakanın kurlenme işlemi yaklaşık 7 saat sürmüştür. Plakalar kurlenme için önce 1 saat 100 °C de bekletilmiş ve sonra geri kalan sürede oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. CFTE kompozit plakalar üretilirken özelliği düz örgülü 300 g/m<sup>2</sup> olan cam fiber kumaşlar kullanılmıştır. Aynı şekilde KFTE kompozit plakalar üretilirken de özelliği düz örgülü 245 g/m<sup>2</sup> olan karbon fiber kumaşlar kullanılmıştır. Tablo 1'de testlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

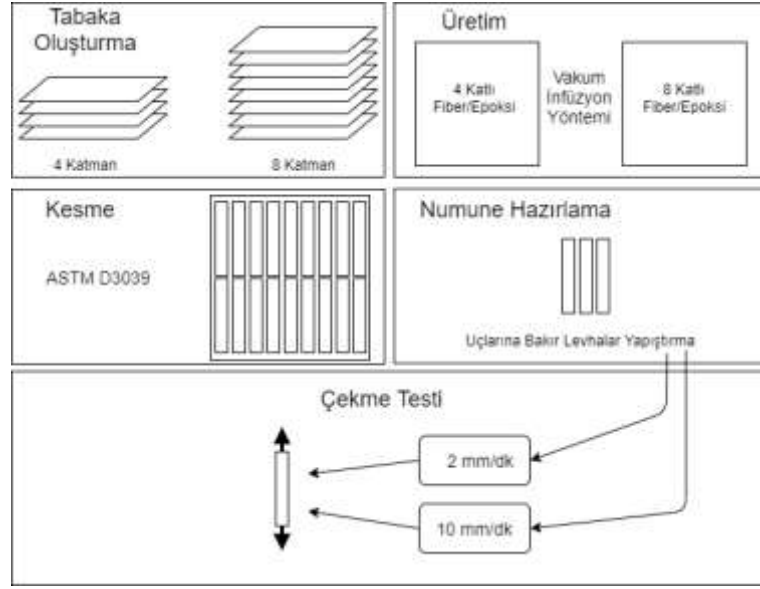
**Tablo 1.** Fiber ve matris malzemelerinin mekanik özellikleri

	Cam Fiber	Karbon Fiber	Matris
Çekme Gerilmesi	2306 MPa	3800 MPa	72-76 MPa
Elastisite Modülü	81.5 GPa	240 GPa	2940-3100 MPa
Çekme birim şekil değiştirmesi	% 2,97	% 1,6	% 8,0-9,0

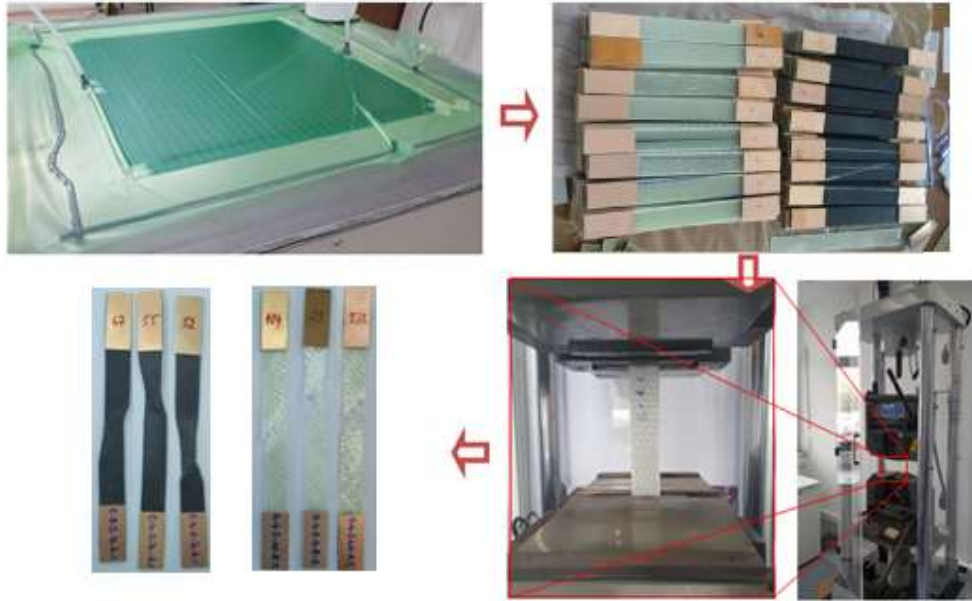
Kompozit plakalardan sırasıyla, oryantasyonları  $[0/90]_w$ ,  $[15/-75]_w$ ,  $[30/-60]_w$  ve  $[45/-45]_w$  olacak şekilde, bilgisayar kontrollü giyotin aracılığıyla numuneler kesilmiştir. Numunelerin boyutları ASTM D3039 standartlarına göre belirlenmiştir. Plakalardan, her bir test durumu için 3 numune hazırlanmıştır. Numune kesme işlemleri CFTE 4 katlı, CFTE 8 katlı, KFTE 4 katlı ve KFTE 8 katlı kompozit plakalar için tekrarlanmıştır. Kesme işlemleri sonunda toplam 72 numune 250 x 25 mm olarak hazırlanmıştır.

Numunelerin çekme testi esnasında, çekme cihazının çeneleri tarafından hasara uğramaması için uç kısımlarına 25 x 55 mm boyutlarında bakır parçalar yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminde siyanoakrilit bazlı MITREAPEL yapıştırıcısı kullanılmıştır. Testlerde bu yapıştırma bölgelerinde adezyon ya da kohezyon hasarı meydana gelmemiştir.

Hazırlanan numunelerin çekme dayanımları incelenmiştir. Çekme testleri ALŞA Universal Çekme Cihazında yapılmıştır. Çekme testleri ASTM D3039 standardına göre çekme hızı 2 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Çekme hızının etkisinin de gözlemlenebilmesi için CFTE numuneler için ek olarak 10 mm/dk testleri de gerçekleştirilmiştir. Testler sonunda maksimum gerilme, maksimum birim şekil değiştirme ve tokluk değerleri karşılaştırılmıştır. Çekme testlerinin tamamı oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Test işlemindeki süreçler Şekil 1'de şematik olarak özetlenmiştir. Numunelerin hazırlanışı, test düzeneği ve test sonrası numunelerin görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Test şeması (Experiment scheme)



Şekil 2. Numunelerin hazırlanışı, test düzeneği ve test sonrası numunelerin görünüşü (Preparation of samples, test set-up and appearance of samples after testing)

### 3. Deneysel Sonuçları ve Tartışma

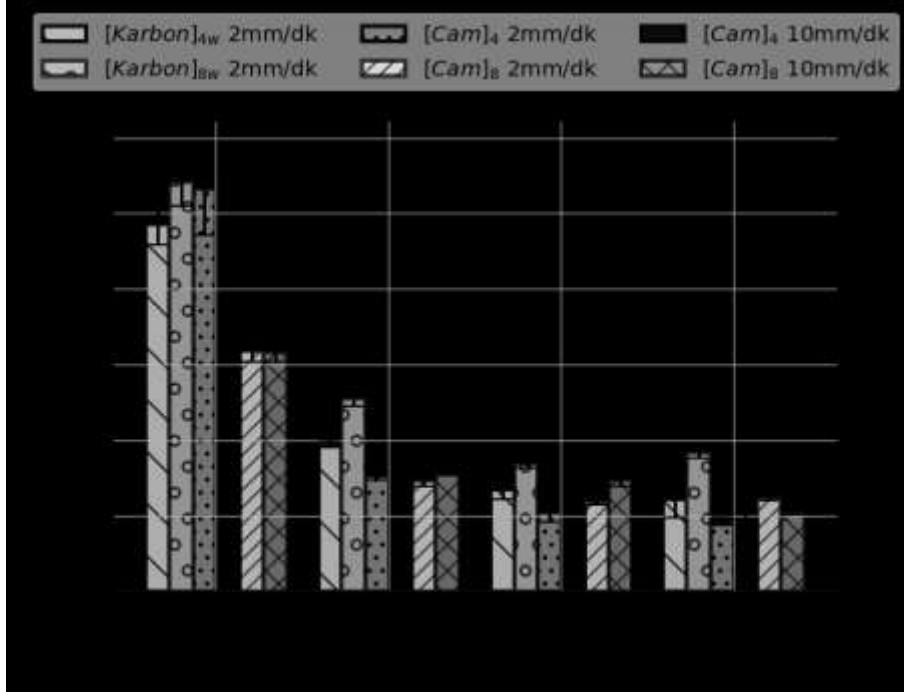
Bu çalışma kapsamında yapılan testlerde elde edilen sonuçlar tasarımcılar için kullanışlı olabileceği düşüncesiyle çeşitli veri analiz teknikleri kullanılarak maksimum çekme gerilmesi, kopma şekil değiştirmesi ve tokluk açısından araştırılmıştır. 3 tekrarlı yapılan testler neticesinde, test belirsizlikleri grafiklerde gösterilmiştir. Toplamda 72 farklı testin sonuçları Python programlama dilinin sunduğu büyük veri analiz araçlarıyla bütünleşik olarak değerlendirilmiş ve sonuçlar mümkün olan en az grafikte ifade edilmeye çalışılmıştır.

#### 3.1 Maksimum çekme gerilmesi açısından deneysel sonuçları

Şekil 3'de maksimum çekme gerilmesinin oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi gösterilmiştir. Yükleme yönüyle, fiberlerin yönü arasındaki açı arttıkça maksimum çekme gerilmesi azalmaktadır. Bu azalma



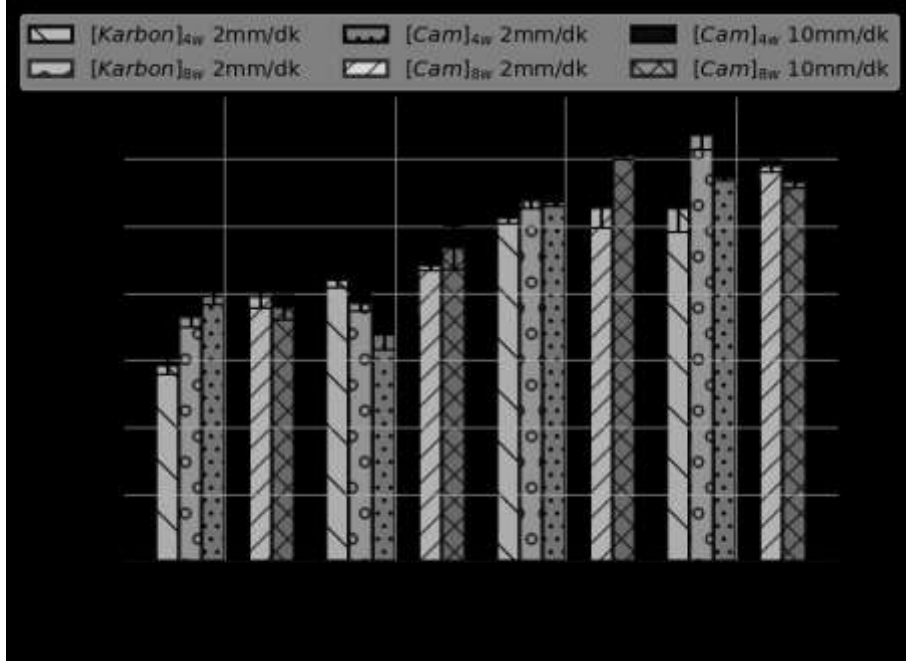
her iki fiber tipinde ve farklı test hızlarında da görülmektedir. Karbon fiber/epoksilerde katman sayısı arttıkça maksimum çekme gerilmesi artarken, cam fiber/epoksilerde  $[0/90]_w$  diziliminde ciddi düşüş gözlemlenmiştir. Diğer fiber açılarında kopma gerilmesi benzer niteliktedir. Çekme hızının maksimum çekme gerilmesi üzerinde önemli bir etkisi gözlemlenmemiştir.  $[0/90]_w$  oryantasyon haricindeki dizilimlerde karbon fiber/epoksiler cam fiber/epoksilere göre daha yüksek dayanım göstermektedir. Fiber yönündeki yüklemeler için 4 katmanlı karbon ve cam fiberlerin yakın mukavemet özellikleri göstermesi sebebiyle, bu tip durumlarda ekonomik olması açısından cam fiberlerin tercih edilmesi daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Maksimum çekme gerilmesinin oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi (Variation of failure stress with orientation, fiber type and tensile speed)

### 3.2 Kopma şekil değiştirmesi açısından deney sonuçları

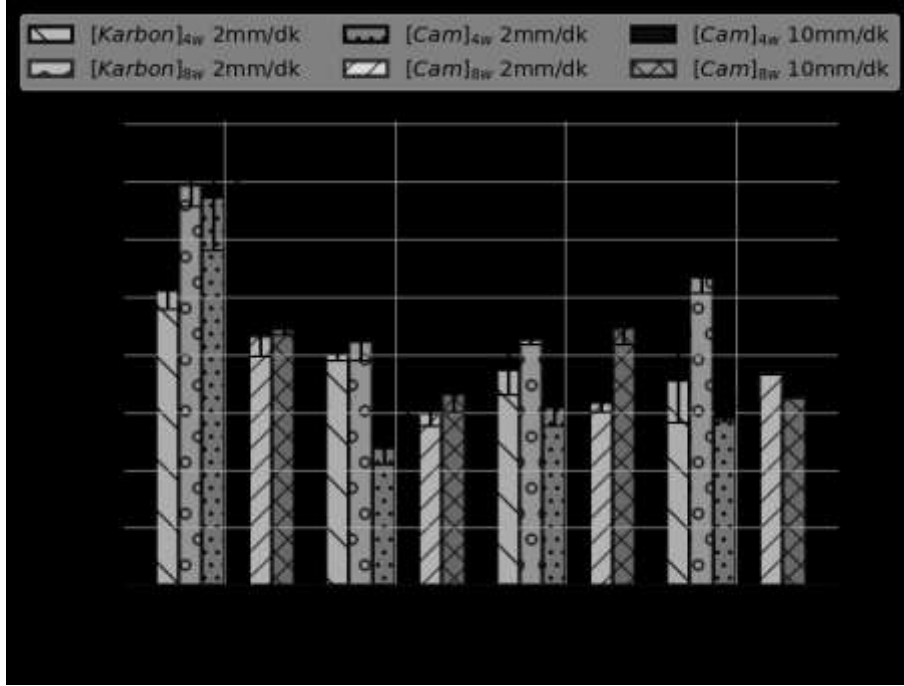
Şekil 4’de kopma şekil değiştirmesinin oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi gösterilmiştir. Birim şekil değiştirme açısından değerlendirildiğinde, çekme yönüyle yapılan açı arttıkça fiber/epoksi malzemeler gevrekten süneğe doğru bir davranış gösterir. Böylece oryantasyon açısı arttıkça genel olarak kopma şekil değiştirmesi de artmaktadır.  $[0/90]_w$  diziliminde karbon fiber/epoksiler cam fiber/epoksilere göre daha az uzarlar. Karbon fiber/epoksiler,  $[45/-45]_w$  oryantasyonda cam fiber/epoksilere göre daha fazla belirsizlik oluşturmuştur. Bu sebeple, bu oryantasyon diğer oryantasyonlarla beraber değerlendirildiğinde cam ve karbon fiber/epoksiler benzer kopma şekil değiştirmesi göstermiştir. Çekme hızının kopma şekil değiştirme üzerinde etkisi gözlemlenmemiştir. Çekme hızının ve oryantasyon açısının kopma şekil değiştirmesi üzerindeki etkileri birbirinden bağımsızdır.



Şekil 4. Kopma şekil değiştirmesinin oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi

### 3.3 Tokluk açısından deney sonuçları

Tokluk tasarımcılar açısından dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Böylece kırılma için birim hacimde harcanması gereken enerjiye göre malzeme seçimi yapılabilir. Tabakalı fiber/epoksi kompozitlerin tokluk açısından kıyaslanması Şekil 5’de gösterilmiştir. Şekil 3’de görüldüğü üzere maksimum çekme gerilmesi  $[0/90]_w$  de görülürken, Şekil 4’deki kopma şekil değiştirmesi  $[45/-45]_w$  oryantasyonda en yüksek değerine ulaşmıştır. Genel eğilim olarak  $[0/90]_w$  oryantasyon tokluk açısından en yüksek tokluğa sahiptir. Fiber tipleri açısından  $[0/90]_w$  oryantasyondaki cam fiber haricinde, karbon fiberler daha yüksek tokluğa sahiptir. Çekme hızının etkisi değerlendirildiğinde, genelde çekme hızıyla emilen enerji miktarı sınırlı seviyede artmıştır. Katman sayısının etkisine bakıldığında,  $[0/90]_w$  oryantasyondaki cam fiberler haricinde katman sayısı ile malzemede depolanan enerji artmıştır.



Şekil 5. Tokluğun oryantasyon, fiber tipi ve çekme hızı ile değişimi (Variation of toughness with orientation, fiber type and tensile speed)

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada fiber/epoksi kompozit malzemelerin fiber tipinin (Cam ve Karbon fiber), çekme hızının (2 mm/dk ve 10 mm/dk), katman sayısının (4 kat ve 8 kat) ve oryantasyon açılarının ( $[0/90]_w$ ,  $[15/-75]_w$ ,  $[30/-60]_w$  ve  $[45/-45]_w$ ) mukavemete etkisi incelenmiştir. Bu amaçla tam faktöriyel deney tasarımıyla toplam 72 adet test gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar büyük veri işleme teknikleriyle parametrelerin birbirleriyle olan ilişkilerini içerecek şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular genel olarak şu şekilde özetlenebilir:

- Oryantasyon açısı mukavemet üzerinde çok etkili olsa da, bu çalışmada incelenen diğer parametrelerle birlikte değerlendirildiğinde etkisi farklı oranlardadır.
- Maksimum çekme gerilmesi ve en yüksek enerji emilimi tüm durumlar için  $[0/90]_w$  oryantasyonunda gerçekleşmiştir. En fazla kopma şekil değiştirmesi  $[45/-45]_w$  oryantasyonunda oluşmuştur. Gerilme, kopma şekil değiştirmesi ve enerji emilimi ara dizilimlerde açıyla orantılı olarak değişmektedir.
- $[0/90]_w$  oryantasyonu haricindeki oryantasyonlarda karbon fiber/epoksiler, cam fiber/epoksilere göre daha yüksek dayanım göstermektedir. Fiber yönünde yüklemeye maruz kalacak az katmanlı tasarımlarda ekonomik açıdan cam fiberlerin, karbon fiberler ile benzer mukavemet özelliği göstermesi sebebiyle tercih edilmesi daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.
- Karbon ve cam fiberlerde katman sayısının artmasıyla genelde bir mukavemet artışı olduğu gözlemlenmiştir.
- Cam fiber/epoksilerde 2 mm/dk ve 10 mm/dk hızları için yapılan testlerde, maksimum çekme gerilmesi ve kopma şekil değiştirmesinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir ve benzer davranış görülmüştür. Enerji emilimi açısından değerlendirildiğinde, çekme hızının armasıyla enerji emilimi sınırlı olarak artma eğilimindedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FBA-2020-3750.

### Kaynaklar

- [1] Tarfaoui M., Choukri S., Neme A., Effect of fibre orientation on mechanical properties of the laminated polymer composites subjected to out-of-plane high strain rate compressive loadings, *Compos. Sci. Technol.*, 68(2), 477-485, 2008.
- [2] Ekşi S., Genel K., Comparison of Mechanical Properties of Unidirectional and Woven Carbon, Glass and Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Acta Phys. Pol. A*, 132(3-II), 879-882, 2017.
- [3] Banakar P., Shivananda H.K., Niranjan H.B., Influence of Fiber Orientation and Thickness on Tensile Properties of Laminated Polymer Composites, *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 9, 2012.
- [4] Kaleemulla K.M., Siddeswarappa B., Influence of Fiber Orientation on the In-plane Mechanical Properties of Laminated Hybrid Polymer Composites, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 29(12), 1900-1914, 2010.
- [5] Bie B.X., Huang J.Y., Fan D., Sun T., Fezzaa K., Xiao X.H., Qi M.L., Luo S.N., Orientation-dependent tensile deformation and damage of a T700 carbon fiber/epoxy composite: A synchrotron-based study, *Carbon*, 121, 127-133, 2017.
- [6] Wang H.W., Zhou H.W., Gui L.L., Ji H.W., Zhang X.C., Analysis of effect of fiber orientation on Young's modulus for unidirectional fiber reinforced composites, *Compos. Part B Eng.*, 56, 733-739, Oca. 2014.
- [7] Saad N.A., Hamzah M.S., Hamzah A.F., Numerical and Experimental Investigation for Tensile Properties of Polyphenylene Sulfide Basis Composite Material, *J. Babylon Univ.*, 10, 22, 2014.
- [8] Rahmani, H., Najafi, S. H. M., Saffarzadeh-Matin, S., Ashori, A., Mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites: Effects of number of plies, fiber contents, and angle-ply layers. *Polymer Engineering & Science*, 54(11), 2676-2682, 2014.
- [9] Demircan G., Özen M., Kısa M., Flexural Properties of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites at Different Strain Rates, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22(64): 271-276, 2020.
- [10] Adem, E., Didwania, M., Reddy, G. M., Koricho, E. G., Experimental Analysis of E-Glass/Epoxy & E-Glass/polyester Composites for Auto Body Panel, *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 10(4), 377-383, 2015.
- [11] Zhang Z., Hou S., Mao Y., He L., Han X., Rate-related study on the ply orientation of carbon fiber reinforced epoxy composite laminates, *Int. J. Mech. Sci.*, 1-37, 2020.
- [12] Zhau X.F., Wagner H.D., Fragmentation of two-Fiber hybrid micro composites: stress concentration factors and interfacial adhesion, *Compos. Sci. Technol.*, 60, 367-377, 2000.
- [13] Mahdi E., Hamouda A.M.S., Sebaey T.A., The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes, *Mater. Des.* 1980-2015, 56, 923-928, 2014.
- [14] Okoli O.I., The effects of strain rate and failure modes on the failure energy of fibre reinforced composites, *Compos. Struct.*, 54, 299-303, 2001.
- [15] Darıcık F., Çelebi K., Karbon Lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Farklı Ortam Şartlarındaki Mod I Kırılma Davranışı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1): 223-234, 2017.



## Evsel Arıtma Çamurunun Kapalı Solar Kurutulmasında Mevsim Faktörünün Değerlendirilmesi

Emine SAYILGAN<sup>1\*</sup>, Hayriye Işıl ÜNLÜ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

<sup>\*1</sup> eminesayilgan@sdu.edu.tr, <sup>2</sup> isilunlu01@gmail.com

(Geliş/Received: 06/09/2020;

Kabul/Accepted: 23/11/2020)

**Öz:** Arıtma çamurları; kompleks yapıları, yüksek organik içerikleri, metal/ağır metal içermeleri, büyük hacim kaplamaları, koku problemi, yüksek su içeriği gibi sebeplerle ekonomik ve çevresel problemler yaratmaktadır. Arıtma çamurlarının kurutulması ile hacim, kütle miktarları azaltılarak, taşıma maliyetleri önemli ölçüde düşmektedir. Bu çalışma kapsamında Isparta Atıksu Arıtma Tesisi arıtma çamurunun kapalı solar sistemde farklı mevsimlerde kurutulması, farklı iklim koşullarında çamur susuzlaştırma ve toplam katı madde miktarlarına olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, temin edilen arıtma çamuru Temmuz, Ekim, Ocak ve Nisan aylarında kapalı solar kurutma sisteminde kurutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, kış mevsiminde arıtma çamurunun %90 oranında kuruluk değerine ulaşması için 15-20 gün gerekirken; yaz mevsiminde 5 günün yeterli olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, kapalı solar sistemlerde, çalışma şartları kontrollü olduğu için, olumsuz iklim şartlarının kuruluk ve katı madde oranları üzerine etkisi çok önemli ölçüde olmamıştır. Bu durum, kapalı solar kurutma tesislerinin yılın her günü çalıştırılabilmesi adına olumlu bir sonuç olarak değerlendirilebilir.

**Anahtar kelimeler:** Arıtma çamuru, kapalı solar kurutma, toplam katı madde.

### Evaluation of Season Factor in Closed Solar Drying of Domestic Treatment Sludge

**Abstract:** Treatment sludges have to be considered as economic and environmental problems due to their complex structure, high organic content, metal/heavy metal content, large volume problem, odor problem, and high water content. Volume and mass amounts and also transportation costs are significantly reduced with drying of sewage sludge. In this study, the effects of different climatic conditions on sludge dewatering and total dry solids were investigated by drying the treatment sludge of Isparta Wastewater Treatment Plant in a closed solar system in different seasons. For this purpose, supplied sewage sludge was dried in a closed solar drying system in July, October, January and April. The results showed that 15-20 days were required for treatment sludge to reach 90% dryness in winter and it was observed that 5 days were sufficient in summer. However, in closed solar systems, the effect of adverse climatic conditions on dryness and solid matter ratios was not significant, as the working conditions were controlled. This situation can be considered as a positive effect for the indoor solar drying plants to be operated every day of the year.

**Key words:** Wastewater sludge, indoor solar drying, total solid matter.

#### 1. Giriş

Arıtma tesislerinde su ve atıksu arıtımı sonucunda oldukça fazla miktarda arıtma çamuru (AÇ) oluşmaktadır. Üretilen ham çamur miktarı, genellikle 1,2-2,4 kg/gün aralığındadır [1]. Ülkemizde atıksu arıtma işlemleri sonucunda 2018 yılı verilerine göre 319 bin ton AÇ oluştuğu tespit edilmiştir [2]. Arıtma çamurları yoğun kirletici içermeleri ve oldukça fazla hacim kaplamaları sebebiyle tüm dünyada gün geçtikçe artan çevresel bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. AÇ'nun içeriği toprak ve bitkiler için yararlı olabilirken; ağır metal, toksik elementler içermesi sebebiyle de zararlı olabilmektedir [3].

Daha önceki yıllarda tesislerde oluşan fazla çamurlar için araziye depolama yöntemi çok sık kullanılmaktayken, günümüzde çevresel yaptırımlar ve çevreye verdiği zararlar sebebiyle araziye depolama yöntemi tercih edilmemektedir. AÇ'nda bulunan metal konsantrasyonlarının bazı durumlarda yönetmelik limitlerini aşması sebebiyle, araziye depolama yönteminin uygulanması problem oluşturabilmektedir. AÇ'nun bertarafında ilk amaç çamur miktarı ve hacmini azaltarak alan ve transfer maliyetlerini azaltmaktır. AÇ'larının değerli bir kaynak olarak dikkate alınması, insan sağlığı ve çevre için sağlanması gereken element ve patojen sınır değerlerinin gerekli limitlerin altına düşürülmesi gerekmektedir [4].

AÇ'na ilk işlem olarak susuzlaştırma uygulanmaktadır. Fakat, halihazırda uygulanan mekanik susuzlaştırma yöntemleri, nihai bertaraf aşamasında teknik ve yasal açıdan yeterli olamamaktadır. Bu sebeple AÇ'nun su

\* Sorumlu yazar: [eminesayilgan@sdu.edu.tr](mailto:eminesayilgan@sdu.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-6756-1545, <sup>2</sup> 0000-0002-3376-8679

içeriğinin öncelikle mekanik susuzlaştırmayı takiben doğal ve termal yöntemlerle de azaltılması gerekmektedir [5]. Oluşan 319 bin ton arıtma çamurunun yaklaşık 142 bin tonu enerji geri kazanımlı yakma, 180 bin tonu düzenli ve düzensiz depolama, 17 bin tonu ise araziye boşaltma, 30 bin tonu geçici depolama ve 7 bin tonu ise diğer yöntemlerle değerlendirilmektedir [2]. Uygulanan bu yöntemler enerji gereksinimi, arazi gereksinimi gerektirmekte ve çevresel açıdan risk oluşturabilmektedir. AÇ'larının çevre dostu yöntemlerle değerlendirilmesi ve yönetilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda halihazırda kullanılan yöntemler araziye depolama, tarımsal uygulama, kompostlama ve termal kurutmadır. Bununla birlikte, günümüzde solar kurutma uygulamaları da kullanılmaya başlamıştır.

Solar kurutma yönteminde, çamur miktarını azaltmak için AÇ doğal veya mekanik yollarla kurutulmaktadır. Halihazırda kullanılan fosil yakıtlar, pahalı olmaları ve yanma sonucunda zararlı gazların oluşması sebebiyle tercih edilmemelidir. Maliyet oluşturmaması ve/veya sınırlı miktarda ilk yatırım maliyeti oluşturması ve çevre dostu olması sebebiyle solar enerji ön plana çıkmaktadır [6]. Solar kurutma sistemlerinde, ana enerji kaynağı güneş varlığında doğal susuzlaştırma ve kurutma yöntemleri kullanılmaktadır [7, 8]. Çamur kurutma işleminde güneş enerjisi kullanılarak çok fazla enerji tasarrufu sağlanabilmekte ve diğer geleneksel çamur termal kurutma sistemlerine kıyasla işletme maliyetleri azalabilmektedir [9]. Solar kurutma için gözönünde bulundurulması gereken parametreler, iklim şartları, çamur kurutma karakteristikleri ve kurutma tesisinin dizaynidir. Ayrıca, tesis için gerekli alan, çamurun özelliği, yağış alma, bağıl nem, sıcaklık gibi atmosferik koşulların da dikkate alınması gerekmektedir [10].

Ülkemizde faaliyette olan kapalı solar kurutma yöntemleri incelendiğinde Muğla'nın Fethiye ilçesinde kurulmuş olan solar kurutma tesisinde arıtma çamuru %50 kuruluğa ulaşmaktadır [11]. Antalya Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Solar Çamur Kurutma Tesisinde ise %18-25 kuruluğundaki çamur keki, %85'den fazla kuruluğa çıkarılabilmektedir. %90 kuruluğa getirilen AÇ, Çevre ve Şehircilik Bakanlığından Lisanslı Çimento Fabrikalarına ek yakıt olarak gönderilmektedir.

Ülkemizde AÇ'larının toprakta kullanılabilmesi ile ilgili, 27661 sayılı 03.08.2010 tarihli yönetmeliğe göre, ham çamurun toprakta kullanılması yasak olmakla birlikte stabilize arıtma çamurunun kullanılmasında bazı sınırlamalar gerekmektedir. Gerekli sınırlamaların yanında AÇ'larının en az %90 kuru madde değerine kadar kurutulması esastır. Ancak AÇ üreticileri %90 kuru madde değerine ulaşmadan kullanımının teknik ve ekonomik açıdan uygun olduğunu belgelemesi durumunda Bakanlıkça %90 kuru madde değerine ulaşması şartı aranmamaktadır [12]. Bu bağlamda da AÇ'larının belli bir kuruluk değerine getirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında Isparta Evsel Atıksu Arıtma Tesisi susuzlaştırma ünitesi çıkışından temin edilen AÇ'nun kapalı solar kurutma sisteminde farklı mevsimlerde kuruluk ve katı madde oranlarındaki değişimler araştırılmıştır. Yapılan literatür taramalarında, daha önce yapılan çalışmaların özellikle kurutma kinetikleri üzerine yoğunlaştığı veya kuruluk araştırmaların daha kısa süreli çalışmalarla irdelendiği görülmüştür. Daha kapsamlı yapılan birkaç çalışmada ise, bu çalışmada irdelenen AÇ ile çalışılmamış olması ve Akdeniz Bölgesi'nin solar radyasyon bakımından avantajlı olması sebebiyle bu çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, AÇ'nun kapalı solar kurutulmasında mevsimsel değişimin etkisi bu çalışmayı orijinal kılmaktadır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Isparta evsel atıksu arıtma çamuru temini ve karakterizasyonu

Isparta Atıksu Arıtma Tesisi, aktif çamur prosesi ve santrifüj susuzlaştırma prosesleri uygulanarak işletilmektedir. Tesis susuzlaştırma ünitesi çıkışından 2019 yılı Temmuz ayında yaklaşık 25 kg AÇ temin edilmiştir. Temin edilen AÇ'nun görüntüsü akışkan kıvamda olmayıp, normal AÇ görüntülerine görece daha konsantre bir çamur görüntüsündedir. Bu sebeple, rutin AÇ numunelerinde olması gereken kuru madde miktarlarına görece daha yüksek kuru madde miktarına sahiptir.

Deneysel çalışmalar, mevsimsel olarak yürütülmüştür. Aynı AÇ'nu temsil etmesi amacıyla, temin edilen AÇ, 4 eşit miktara ayrılarak, deney yapılacak olan mevsime kadar, herhangi bir bozunma olmaması sebebiyle buzdolabında -20 °C'de saklanmıştır. Orijinal AÇ'nun karakterizasyon analizleri AÇ temin edildiğinde bekletilmeden yapılmıştır. Toplam Katı Madde (TKM), Uçucu Katı Madde (UKM) analizleri Antalya Organize Sanayi Bölgesi'nde, Standart metotlar [13] izlenerek yapılmıştır. pH değerleri WTW pH 330i marka pH-metre ile ölçülmüştür. Arsenik (As), Kadmiyum (Cd), Krom (Cr), Bakır (Cu), Demir (Fe), Mangan (Mn), Nikel (Ni), Kurşun (Pb), Çinko (Zn) elementleri ve toplam fosfor (TP) konsantrasyonunu belirlemek üzere 0,5 g AÇ'na 3 mL HCl ve 9 mL HNO<sub>3</sub> eklenerek 200°C'de ısıtıcıda (hot plate) yakma işlemi uygulanmıştır. Element ve toplam fosfor konsantrasyonları SDÜ Mühendislik Fakültesi Jeotermal Enerji Yeraltısuyu ve Mineral Kaynakları Araştırma Laboratuvarı'nda ICP-OES cihazı'nda (Perkin Elmer, Optima 2100 DV) ile Standart Metotlar izlenerek belirlenmiştir [13].

## 2.2. Kapalı solar kurutma düzeneği

Kapalı solar kurutma düzeneği, Antalya ili Organize Sanayi Bölgesi'nde 100 cm x 100 cm boyutlarında tasarlanmıştır. Kurutma işlemi sera tipi kurutucu ile gerçekleştirilmiştir. Kapalı solar kurutma tesisinin malzemesi polikarbonat sera örtüsünden tasarlanmıştır. Zemin sızdırmazdır. Dışarıdan herhangi bir ısıtma takviyesi alınmamıştır. Sera içerisindeki sıcaklık kayıt altına alınarak, güneş radyasyonu, güneş ışınımı, rüzgar hızı, iç bağıl nem ölçümü gibi meteorolojik bulgular günlük olarak izlenmiştir. Deneyler her mevsimi temsilen Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında yapılmıştır. Örneğin, kış ayını temsilen 1-30 Ocak tarihlerinde bir ay boyunca rutin izlemeler, deneysel çalışmalar yapılmış; Ocak ayı sonunda arıtma çamuru numuneleri tamamen kaldırılmıştır. Aynı çalışmalar Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında da birer ay olmak üzere tekrar edilmiştir.

## 2.3. Deneysel çalışmalar

AÇ'ları her mevsimi temsilen Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında bir ay süreyle Kapalı Solar Kurutma Düzeneği'ne serilmiştir. Antalya ili Organize Sanayi Bölgesinde kurulan sisteme ilk AÇ numunesi Temmuz ayında serilmiştir. Serilen AÇ her gün manuel olarak karıştırılmıştır. 1 aylık rutin deneyler yapıldıktan sonra AÇ kaldırılarak, Ekim, Ocak ve Nisan aylarında da -20 °C'de bekletilen orijinal AÇ aynı sisteme serilmiş ve 1 ay süresince kurulukları ve katı madde oranları test edilmiştir. Mevsimsel olarak (Temmuz, Ekim, Ocak, Nisan) iç bağıl nem, iç sıcaklık, dış sıcaklık ölçümleri her gün izlenmiş ve Hava-Nem Ölçer cihazı ile ölçülmüştür. Toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM) ve kuruluk deneyleri her mevsim döneminde haftada 2 kez yapılmıştır.

## 3. Araştırma Bulguları

### 3.1. Arıtma çamuru karakterizasyonu

Isparta Atıksu Arıtma Tesisi'nden temin edilen AÇ, 2019 yılı Temmuz ayında temin edildikten sonra, +4°C'de laboratuvar ortamına getirilerek karakterizasyonları yapılmıştır. TKM analizleri Antalya Organize Sanayi Bölgesi Laboratuvarı'nda ikili olarak yürütülmüştür. Element analizleri ise SDÜ Jeotermal Laboratuvarı'nda ICP-OES cihazında analiz edilmiştir. Arıtma çamuru karakterizasyon sonuçları, Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Isparta Atıksu Arıtma Tesisi Susuzlaştırma Ünitesi Çıkışı AÇ karakterizasyonu

Parametreler	Isparta AÇ numunesi	Parametreler	Isparta AÇ numunesi
pH	7,3	Cu (mg/kg)	115,2
TKM (%)	32,9 ±7,102	Fe (mg/kg)	3754
Kuruluk (%)	23,93	Mn (mg/kg)	161,2
As (mg/kg)	bdl	Ni (mg/kg)	9,04
Cd (mg/kg)	bdl	Zn (mg/kg)	658,2
Cr (mg/kg)	20,74	Pb (mg/kg)	bdl

bdl: ölçüm limiti altında

Tablo 1'de görüldüğü üzere, AÇ'nun TKM değeri %32,9 olarak bulunmuştur. Salihoğlu [5]'un yapmış olduğu çalışmada da Bursa Atıksu Arıtma Tesisi'nden alınan AÇ'nun genel özelliklerine bakıldığında TKM değerinin % 20,6±1,8; UKM değerinin ise % 60,4 ± 2,1 olduğu belirtilmiştir. Kuruluk değerleri açısından incelendiğinde, susuzlaştırma ünitesi çıkışından alınan AÇ'nun kuruluk değeri yaklaşık %24 olarak bulunmuştur. Bu değer, susuzlaştırma ünitesinden alınan AÇ'ları için ortalama bir değerdir. Literatür çalışmalarında da susuzlaştırma ünitesi dekantör çıkışından çıkan çamurun kuruluk değeri %26,7 olarak [14], susuzlaştırma sonrası çamurun kuruluk değeri %22 [15], santrifüjle susuzlaştırma sonrası %20 [16] olarak belirtilmektedir. AÇ'nun element içerikleri incelendiğinde, Fe konsantrasyonu 3754 mg/kg, Zn konsantrasyonu ise yaklaşık 660 mg/kg olarak tespit edilmiştir.

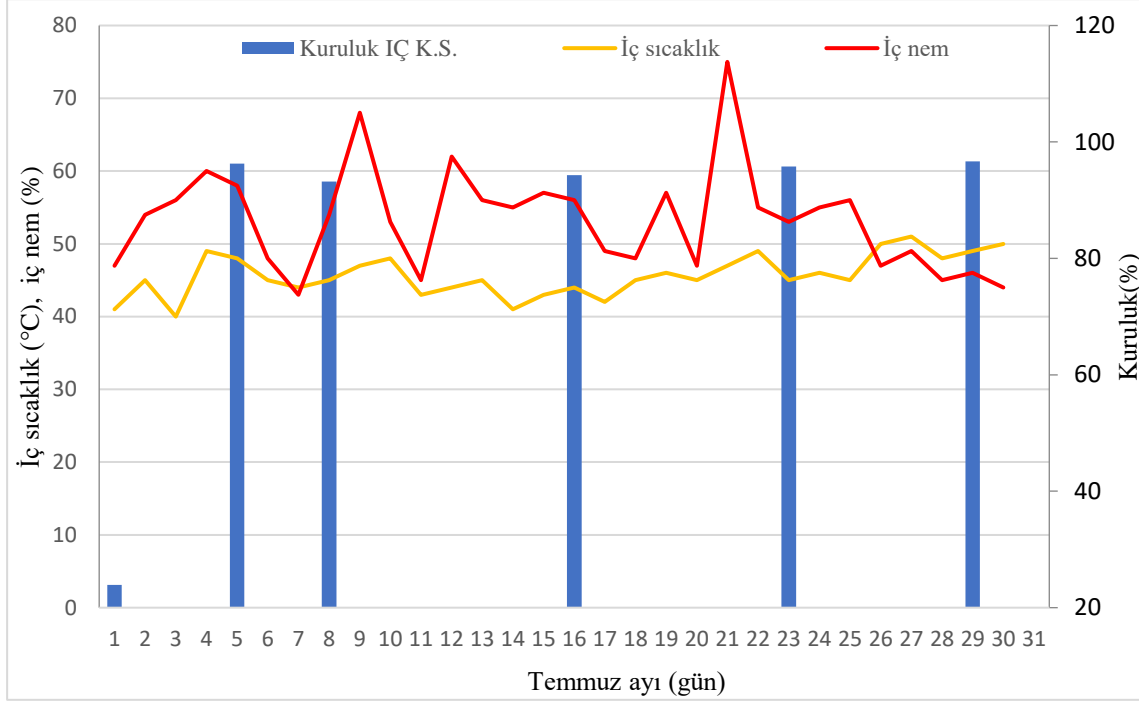
### 3.2. Deneysel Sonuçlar

Kuruluk ve TKM, TUKM analizleri, kapalı solar kurutmanın mevsimsel etkilerini gözlemlemek adına Temmuz, Ekim, Ocak ve Nisan aylarında yapılmıştır. Deney yapılan her aya ait veriler ayrı ayrı incelenmiş olmuş, tüm veriler bölüm sonunda birlikte değerlendirilip, tartışılmıştır.



### 3.2.1. Temmuz ayı deneysel çalışmalar

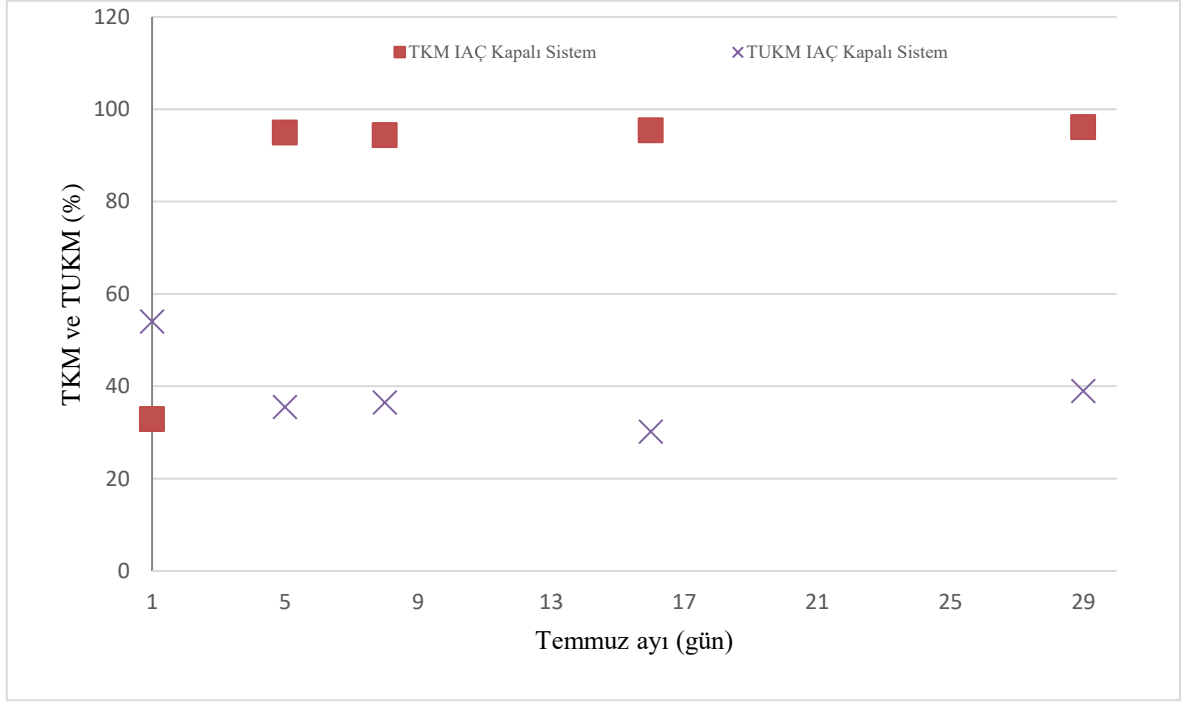
Temmuz ayında kapalı kurutma düzeneği için elde edilen sonuçlar Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Temmuz ayı kapalı solar kurutma düzeneğinde izlenen veriler

Şekil 1’de görüldüğü üzere, Temmuz ayında Antalya ili Organize Sanayi Bölgesinde iç sıcaklık değerleri 40-52°C aralığında değişimler göstermiştir. Temmuz ayının 4. Gününde iç sıcaklık ve nem oranının %60'lara yükseldiği görülmektedir. İç nemin ay sonuna doğru düştüğü görülmüştür. Temmuz ayı ölçümlerinde 5 gün sonrasında AÇ'nun kuruluk değerleri %95'lere ulaşmıştır. 5 günden sonra yapılan kuruluk sonuçlarının çok değişmediği, ay sonunda da %96 değerlerine ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Literatür çalışmalarında da solar kurutmaya tabi tutulan AÇ'lerinin kuru madde miktarlarının 15 gün sonrasında önemli bir şekilde değişmediği; yarı-kurak iklim koşullarında, yaz mevsiminde (20-35 °C) 15 gün solar kurutmanın yeterli olduğu belirtilmiştir [17, 18]. Yapmış olduğumuz çalışmada Temmuz ayı iç sıcaklık değerleri 40-50 °C olduğundan, kuru madde miktarlarının 5 gün gibi daha kısa bir sürede %95 değerlerine ulaşması beklenen bir sonuçtur. Bu ay içerisinde, teknik aksaklıktan dolayı fanların çalışmaması sebebiyle, 21. günde nem miktarında artış gözlenmiştir. Ertesi gün aksaklık giderilmiş ve nem seviyesi normal değerlerine düşmüştür.

Kapalı Solar düzeneğine serilen AÇ'lerinde suyun giderilmesinin tespiti açısından TKM değişimini izlemek önem arz etmektedir. Bu sebeple, farklı mevsimlerde AÇ'unda TKM ve TUKM analizleri yapılmıştır. Temmuz ayı boyunca haftada 3 kere TKM, TUKM analizleri yapılmış ve sonuçlar Şekil 2’de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Kapalı solar sistemdeki TKM ve TUKM sonuçları (%)

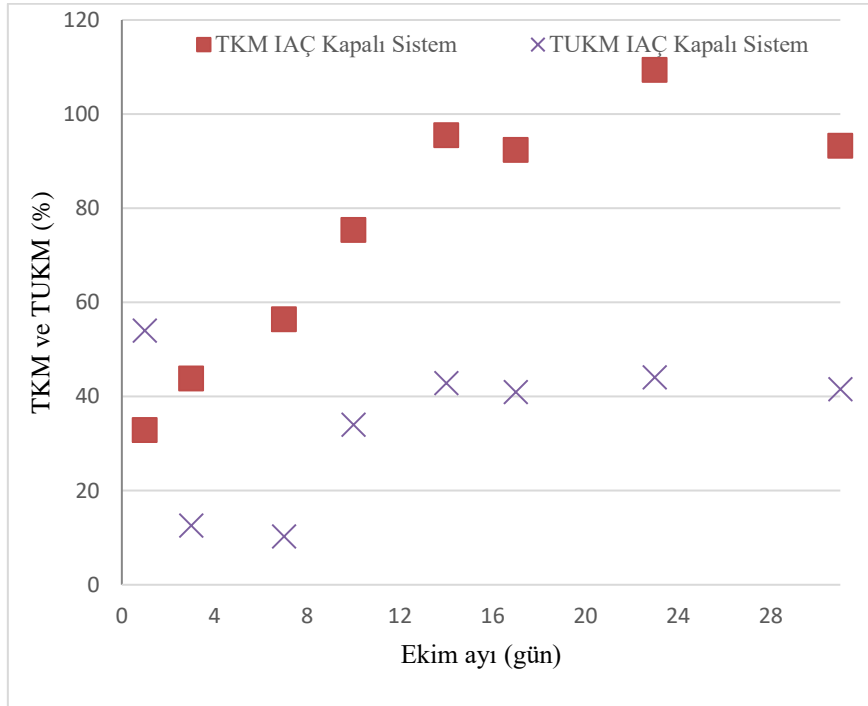
Şekil 2’de Temmuz ayı sonunda kapalı solar kurutma sisteminde AÇ örneğinde 5 gün sonunda TKM değerlerinin yaklaşık %95, TUKM değerlerinin yaklaşık % 40 civarlarında olduğu görülmüştür. Kapalı sistem olmasına rağmen, iç sıcaklığın yüksek olması sebebiyle koku ve sinek oluşumu gözlenmiştir. Üzerinin kapalı olması ve dışarıyla bağlantısının kesilmesi sebebiyle bu durum etrafa zarar vermemiştir. Bu husus, kapalı solar sistemlerin avantajlarından birisi olarak değerlendirilebilmektedir.

### 3.2.2. Ekim ayı deneysel çalışmalar

Ekim ayında kapalı kurutma düzeneği için elde edilen kuruluk sonuçları Şekil 3’de, TKM ve TUKM sonuçları ise Şekil 4’de gösterilmiştir.



Şekil 3. Ekim ayı kapalı solar kurutma düzeneğinde izlenen veriler



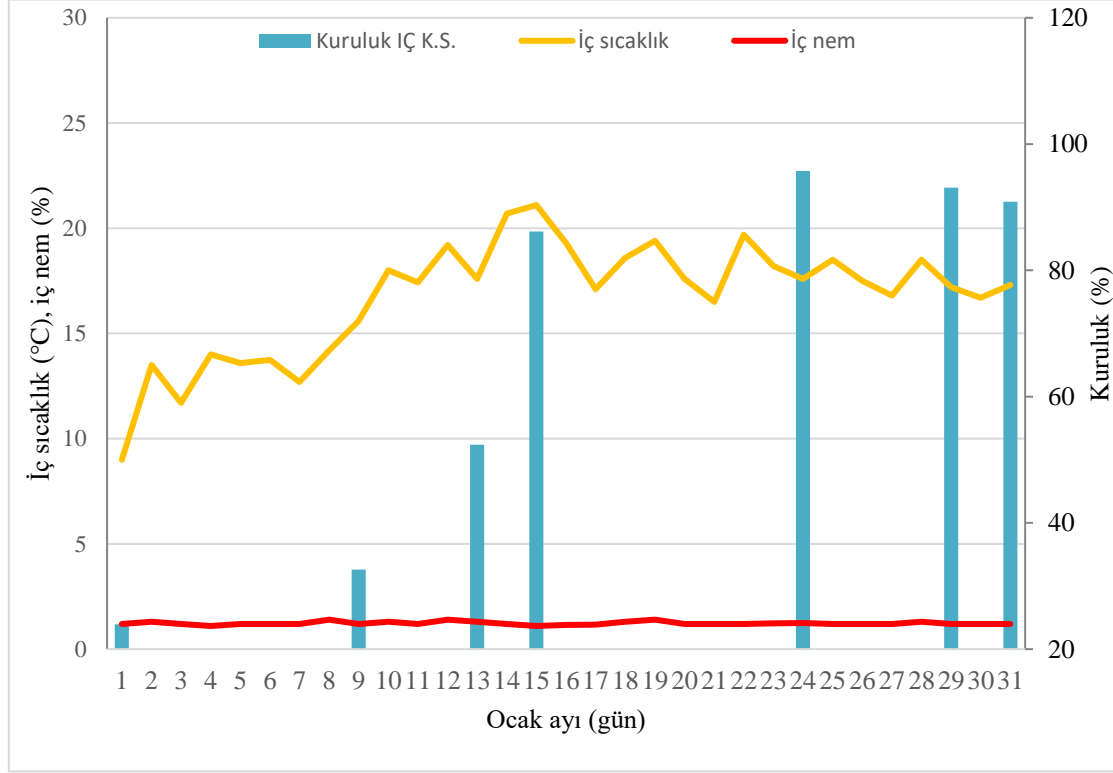
Şekil 4. Kapalı solar sistemdeki TKM ve TUKM sonuçları (%)

Şekil 3'de, Ekim ayında kapalı kurutma düzeneğinde, en yüksek iç sıcaklık 37°C, en yüksek iç nem ise % 9 olarak ölçülmüştür. 2. haftada yağış olması sebebiyle, kapalı sistem olduğu için yağıştan etkilenmemesine rağmen, iç

ortam sıcaklığı ve nemin düştüğü görülmüştür. Ay sonuna doğru maksimum kuruluk değeri olan %96 civarlarına ulaşılmıştır. TKM değerleri açısından incelendiğinde, 17. gün sonunda TKM değerlerinin %100'lere, TUKM değerlerinin ise %40 civarına ulaştığı gözlenmiştir (Şekil 4). İkinci haftada, nem ve iç ortam sıcaklığının düşmesiyle birlikte, çamurun TKM değerlerinde de kısmen azalma görülmüştür. Bu sonuçlar, çamurun kuruluk ve TKM değerlerinin kapalı ortam olmasına rağmen, mevsimsel değişimlerden etkilendiğini göstermektedir.

### 3.2.3. Ocak ayı deneysel çalışmalar

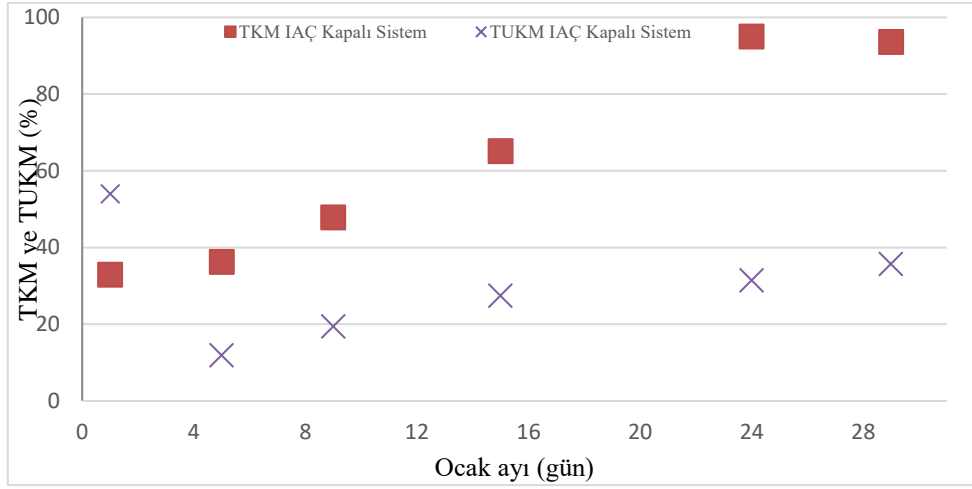
Ocak ayında kapalı kurutma düzeneğinde izlenen veriler Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Ocak ayı kapalı solar kurutma düzeneğinde izlenen veriler

Şekil 5'de gösterildiği üzere Ocak ayında en yüksek iç sıcaklık 23°C, en yüksek iç nem ise %2 olarak ölçülmüştür. İç sıcaklığın, kış ayında olmasına rağmen kontrollü bir ortamda olduğu için çok düşmediği görülmektedir. Bu durum, kapalı solar sistemlerin önemli bir avantajı olarak görülmektedir. Ay sonuna kadar yapılan izlemede kapalı sistemde bulunan AÇ'nun kuruluk değerinin 15 gün sonunda %90'lara, ay sonuna ise %98 civarına ulaştığı görülmüştür. Yaz ayında yapılan deneylere kıyasla, AÇ'nun istenilen kuruluk değerine gelmesi için gereken süre uzamıştır.

Ocak ayında kapalı solar sistemde yapılan TKM, TUKM analizleri sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.

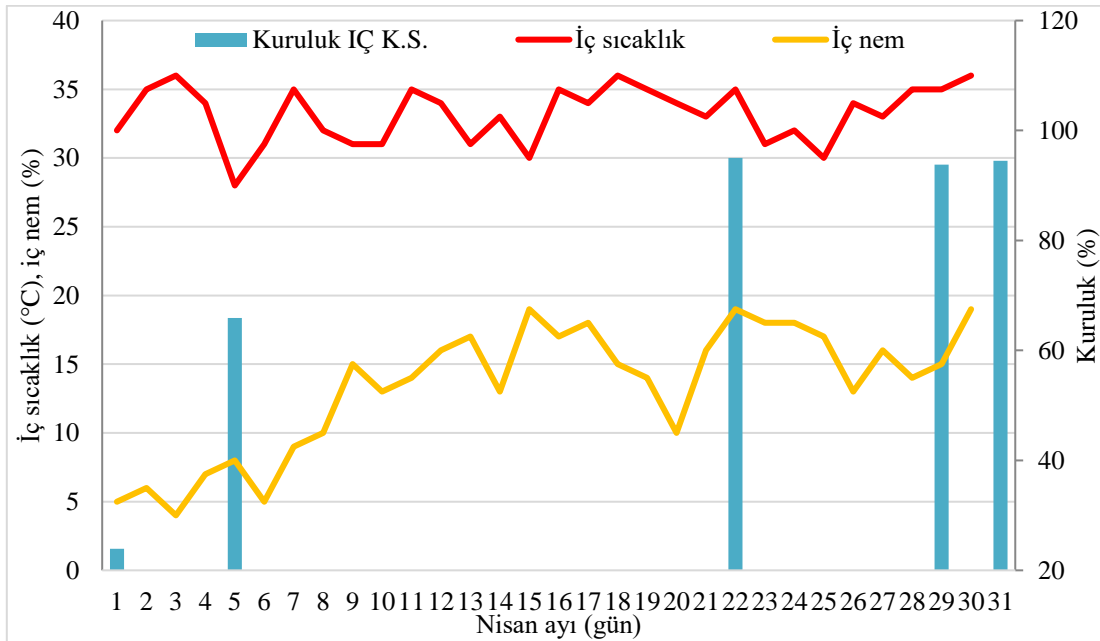


Şekil 6. Kapalı solar sistemdeki TKM ve TUKM sonuçları (%)

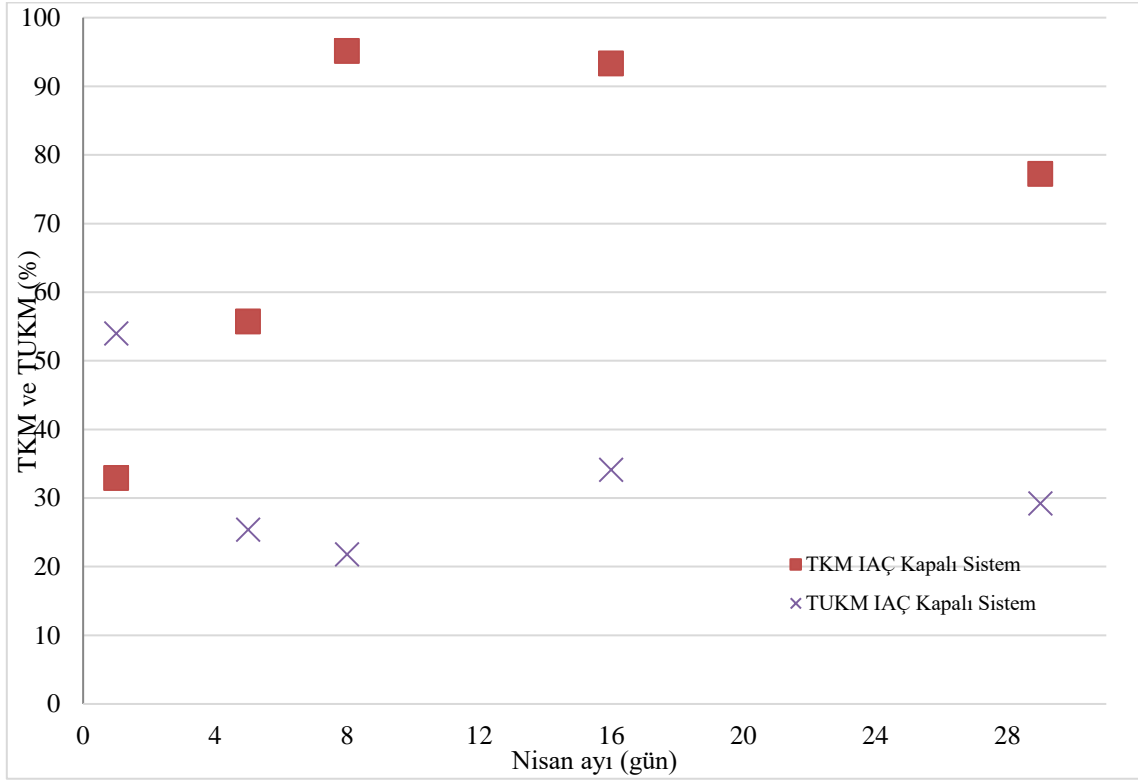
Şekil 6’da Ocak ayında kapalı kurutma sisteminde TKM değerlerinin %90-95 değerlerine ulaşması için 20-25 gün gerektiği görülmektedir. Gerekli kurutmanın olması için gereken süre, deneysel çalışmaların yürütüldüğü diğer mevsimlere göre oldukça uzundur. 24. günde parametreler maksimum seviyeye ulaşmış, bu değerler ay sonunda da değişmeden devam etmiştir. Yaz mevsimine kıyasla, AÇ’nun TKM değerlerinin üzerine çıkması biraz zaman almıştır. Gerçek tesis boyutunda düşünüldüğünde, kış aylarında da çamur kurutmanın başarılı bir şekilde uygulanabileceği, fakat çamur bekleme, depolama süresinin problem yaratabileceği gözönüne alınmalıdır.

### 3.2.4. Nisan ayı deneysel çalışmalar

Nisan ayında kapalı kurutma düzeneğinde izlenen veriler Şekil 7’de, TKM ve TUKM sonuçları ise Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Nisan ayı kapalı solar kurutma düzeneğinde izlenen veriler



Şekil 8. Kapalı solar sistemdeki TKM ve TUKM sonuçları (%)

Şekil 7’de görüldüğü üzere, Nisan ayında kapalı solar kurutma düzeneğinde, en yüksek iç sıcaklık 37°C, en yüksek iç nem ise %18 olarak gözlenmiştir. Nem ay sonuna doğru artmaya başlamıştır. AÇ, 5 gün sonunda %70 oranında, 8 gün sonra %95 oranında kuruluk değerlerine ulaşmıştır, ay sonuna doğru kuruluk değerinde önemli bir değişiklik olmayıp, %90-95 oranında kuruluk değerine ulaşmıştır. Çamur kurutma kinetiği ile ilgili yapılan bir çalışmada da, nem oranının ilk olarak hızlı bir şekilde azaldığı, süre artışıyla nemin oldukça yavaş bir şekilde azaldığı belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak, ilk olarak serbest suyun buharlaştığı, daha sonra yüzeyde absorplandığı belirtilmiştir [19]. Nem içeriği 16. günde %93 den %35’lere düştüğü için AÇ’nun istenilen değerlere gelmesi daha hızlı sonuç vermiştir. TKM değerleri açısından incelendiğinde, 8 gün sonunda TKM değerleri %93’lara ulaşırken, TUKM değerleri ay sonunda %30 civarında çıkmıştır (Şekil 8). Salihoğlu [20], yapmış olduğu çalışmada Nisan ayında solar kurutma yöntemi ile AÇ’nun katı madde değerinin 4 gün sonra %14,51’den %98’e ulaştığını belirtmiştir. Bu sonuçlar, bu makalede tespit edilen sonuçlarla uyumludur.

Tüm ayları dikkate alarak genel bir değerlendirme yapıldığında; deneysel çalışmanın yürütüldüğü kapalı solar sistemde iç sıcaklık yaz mevsiminde 40-50°C, sonbahar mevsiminde ise 25-35°C olarak ölçülmüştür. Ameri vd. [21] solar kurutma için etkili ortalama sıcaklığın solar sistemin çeşidine bağlı olarak 41-43 °C olduğunu belirtmişlerdir. AÇ’nun %90’ın üzerinde kuruluk değerine ulaşması yaz ve sonbahar mevsiminde 5 gün gibi çok kısa bir sürede gerçekleşmiştir. Bu değerler, AÇ’nun hacminin azalması, nakliye masraflarının azalması, AÇ’nun depolama süresinin azalması gibi avantajları sebebiyle dikkate değerdir. Mathioudakis vd. [17] yapmış olduğu çalışmada, yaz mevsiminde çamurun nem içeriğinin 7-12 gün içerisinde %85’den %6’ya düştüğünü, sonbahar mevsiminde ise 9-33 gün aralığında %10’lara düştüğünü tespit etmişlerdir. İklim koşulları yönünden ele alındığında ise kapalı sistem olması dolayısıyla direkt olarak yağış, rüzgar gibi iklim koşullarından etkilenmemekle birlikte, dolaylı olarak kötü iklim koşulları iç ortam sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Antalya gibi sıcak iklim koşullarında bu durum dezavantaj yaratmamakla beraber, yapılacak olan daha soğuk iklim koşullarındaki solar kurutma sistemleri için sıcaklık kontrollü ortamlar daha işlevsel olarak kullanılabilir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında Isparta Atıksu Arıtma Tesisi Susuzlaştırma Ünitesi Çıkışından AÇ temin edilerek kapalı solar kurutma düzeneğinde 4 farklı mevsimi temsilen Ocak, Nisan, Temmuz ve Ekim aylarında birer aylık deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Kapalı solar kurutma düzenekleri Antalya ili Organize Sanayi Bölgesi'nde yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, kuruluk ve TKM, TUKM değerleri dikkate alınarak, kapalı solar sistemin AÇ'nun istenilen kuruluk değerine getirilmesinde uygulanabilir, çevre-dostu bir yöntem olduğu görülmektedir. Bununla birlikte istenilen kuruluk değerine ulaşılması, sonbahar ve yaz mevsimlerinde 5 gün içerisinde gerçekleşirken; kış ve ilkbahar mevsimlerinde 15-20 günü bulmaktadır. Bekleme süresinin soğuk mevsimlerde uzun olması, tesise kapasitesinden fazla AÇ gelmesi durumunda problem teşkil edebilir. Bu gibi durumlarda iç ortam sıcaklığının stabil kalabilmesi için gerekli düzenleme yapmak gerekebilir.

Bununla birlikte, açık solar sistemlerle karşılaştırıldığında, iklim faktöründeki değişiklikler gözönüne alındığında kapalı solar sistemlerin hava olaylarından çok etkilenmemesi, koku problemi yaratmaması gibi sebeplerle daha etkili olacağı düşünülmektedir. AÇ'larının solar kurutma gibi çevre dostu bir yöntemle kurutulması bertaraf edilmesi, çamur hacmi ve kütlesinin azaltılması sebebiyle taşıma maliyetlerinin önemli bir şekilde azalması solar kurutma yöntemlerini öne çıkarmaktadır. Bununla birlikte, AÇ'larının solar kurutma yöntemleri açısından uygulanabilirlik, maliyet karşılaştırılması yapılmasının AÇ türü ve tesis bazında değerlendirilmesi daha gerçekçi olacaktır.

#### Teşekkür

Bu makale H.I.Ü.'nün yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Deneysel çalışmaları H.I.Ü. gerçekleştirmiş olup, E.S. sonuçları yorumlayıp, makaleyi yazmıştır.

#### Kaynaklar

- [1] Chen G, Yue PL, Mujumdar AS. Sludge dewatering and drying. *Drying Technol* 2002; 20(4&5): 883–916.
- [2] Türkiye İstatistik Kurumu, 2018. Haber Bülteni, 30667.
- [3] Solmaz S, Okaygün M. A Novel Technology for Dewatering and Pasteurization of Digested Water Sewage Sludge Utilizing Concentrated Solar Energy. In: 16th International Conference on Clean Energy (ICCE-2018); 9-11 May 2018; Famagusta, N. Cyprus.
- [4] Youssef AS, Kahil MA. Solar Sludge Drying for Medina Al-Munawarah Sewage Treatment Plant in the Kingdom of Saudi Arabia. *J Environ. Eng* 2016; 142(12): 05016006.
- [5] Salihoğlu NK. The effects of limited liming on solar dried wastewater sludges in covered drying beds. *J of Eng and Natural Sci Müh ve Fen Bil Derg.* 2011; 193-199.
- [6] Fudholi A, Ridwan A, Yendra R, Desvina AP, Hartono Majid KBMA, Suyono T, Sopian K. Solar Drying Technology in Indonesia: an Overview. *Int J of Power Elecs and Drive Sys (IJPEDS)* 2018; 4: 1804-1813.
- [7] Kürklü A, Bilgin S, Özkan B. A study on the solar energy storing rock-bed to heat a polyethylene tunnel type greenhouse. *Renew Energy* 2003; 28: 683–697.
- [8] Salihoglu NK, Pinarli V, Salihoglu G. Solar drying in sludge management in Turkey. *Renew Energy* 2007; 32: 1661–1675.
- [9] Lei Z, Dezheng C, Jinlong X. Sewage sludge solar drying practise and characteristics study. 2009; Tongji University, Shanghai, China.
- [10] Ayvaz Z. Atıksu Arıtma Çamurlarının Değerlendirilmesi. *Çevkor Dergisi* 2000; 9s. İzmir.
- [11] CSB, 2019. Link: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/destek/icerikler/ek11-20191127124008.pdf>. Erişim tarihi: 16/08/2020.
- [12] Çevre ve Orman Bakanlığı, 2010. Evsel ve Kentsel Arıtma Çamurlarının Toprakta Kullanılmasına Dair Yönetmelik. 03 Ağustos 2010 tarih ve 27661 sayılı Resmi Gazete, Ankara.
- [13] Standart Metotlar, APHA, AWWA, WEF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21. Baskı. Washinton, DC.
- [14] İkinci MŞ. Atıksu arıtma çamurlarının bertarafında solar kurutma sisteminin kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye, 47s, 2019.
- [15] Collard M, Teychene B, Lemee L. Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes: Solar, thermal and reed beds – Impact on organic matter characteristics. *J of Environ Manage* 2017; 203(2): 760-767.
- [16] Amin Z, Salihoğlu NK. Evaluation of free water removal from different sludge by solar energy utilization. *Environ Eng Res* 2021; 26(3): in press.
- [17] Mathioudakis VL, Kapagiannidis AG, Athanasoulia E, Diamantis VI, Melidis P, Aivasidis A. Extended Dewatering of Sewage Sludge in Solar Drying Plants. *Desalination* 2009; 248: 733–739.
- [18] An-nori A, El Fels L, Ezzariai ,A, Gharous ME, El Mejahed K, Hafid M. Effects of solar drying on heavy metals availability and phytotoxicity in municipal sewage sludge under semi-arid climate. *Env Technol & Innova* 2020; 19: in press.

- [19] Ameri B, Hanini S, Benhamou A, Chibane D. Comparative approach to the performance of direct and indirect solar drying of sludge from sewage plants, experimental and theoretical evaluation. *Solar Energy* 2018; 159(1): 722-732.
- [20] Salihoğlu NK. Yenilenebilir enerji ile artıma çamuru sistemi. *Uludağ Üniv Müh Fak Dergi* 2018; 23(1):41-50.
- [21] Ameri B, Hanini S, Boumahdi M. Influence of drying methods on the thermodynamic parameters, effective moisture diffusion and drying rate of wastewater sewage sludge. *Renew Energy* 2020; 147: 1107-1119.





## Adıyaman İlinin Yenilenebilir Enerji Potansiyelinin Belirlenmesi Üzerine Bir Değerlendirme

Mustafa ASLAN<sup>1\*</sup>, Tuba ULUM<sup>1\*</sup>, Harun TÜRKMENLER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

<sup>1</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye

<sup>2</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye

\*<sup>1</sup> tubaulum6743@gmail.com , \*<sup>1</sup> mustafaaslan63@gmail.com , <sup>2</sup>hturkmenler@adiyaman.edu.tr

(Geliş/Received: 07/04/2020;

Kabul/Accepted:22/01/2021)

**Öz:** Artan enerji talebinin petrol, kömür, doğalgaz vb. fosil kökenli yakıtlardan karşılanması sonucunda doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Bu kaynaklara alternatif oluşturan yenilenebilir enerji kaynakları önemini giderek arttırmaktadır. Dahası, küresel enerji talebinin 2050 ve 2100 itibarıyla yaklaşık 30 veya 46 TW olacağı tahmin edilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlı enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde tükenmesi ile enerji noktasında alternatif oluşturmaktadır. Yenilenebilir enerjinin her geçen gün kullanımı ve önemi artmaktadır. Bu çalışmada, Adıyaman ilinin güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, jeotermal enerjisi, biyokütle enerjisi, hidroelektrik enerjisi, dalga ve hidrojen enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları bakımından potansiyeli araştırıldı. Araştırmada Bepa (Biyokütle Enerjisi Potansiyel Atlası) Yazılım Programı, TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verileri, Solar Med Yazılım programı kullanılmıştır. Bu çalışma neticesinde, Adıyaman ilinin yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli güneş, rüzgâr, hidroelektrik enerjisinden toplam 251.252 MW/yıl, biyogaz enerji potansiyelinden teorik olarak üretilebilecek yıllık elektrik enerjisi ise 1.330 MW/yıl olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda, Adıyaman ilinin yenilenebilir enerjiden bir yılda toplam 252.582 MW/yıl elektrik enerjisi üretebileceği bulunmuştur. Jeotermal, hidrojen ve dalga enerjilerinin bulunmadığı belirlenmiştir. Adıyaman ili için bulunan yenilenebilir enerji potansiyeli miktarı ve bu miktardan elde edilen elektrik enerjisi, yapılacak yatırımlar ve projelerle değerlendirilebilir. Bu noktada yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak ekonomiye katkı sağlanması amaçlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yenilenebilir enerji, Adıyaman, güneş, biyokütle.

### An Evaluation on Determination of Renewable Energy Potential of Adıyaman Province

**Abstract:** Increasing energy demand, oil, coal, natural gas, etc. As a result of being supplied from fossil fuels, natural resources are being depleted rapidly. Renewable energy sources, which are alternative to these resources, are increasing their importance. Moreover, global energy demand is estimated to be approximately 30 or 46 TW by 2050 and 2100. Renewable energy sources constitute an alternative at the energy point with the rapid depletion of fossil fuel energy sources. The use and importance of renewable energy is increasing day by day. In this study, the potential of Adıyaman province in terms of renewable energy sources such as solar energy, wind energy, geothermal energy, biomass energy, hydroelectric energy, wave and hydrogen energy were investigated. In the study Bepa (Biomass Energy Potential Atlas) Software Program, TÜİK (Turkey Statistics Institute) data, the Solar Med software program is used. As result of this study, it has been determined that the potential of renewable energy resources of Adıyaman city is 251,252 MW /year from solar, wind, hydroelectric energy, and annual electricity energy that can be produced theoretically from biogas energy potential is 1,330 MW / year. As a result, it has been found that the city of Adıyaman can generate 252,582 MW /year of electricity per year from renewable energy. It has been determined that geothermal, hydrogen and wave energies are not available. The amount of renewable energy potential found in Adıyaman province and the electrical energy obtained from this amount can be evaluated with the investments and projects to be made. At this point, it is aimed to contribute to the economy by using renewable energy sources.

**Key words:** Renewable energy, Adıyaman, solar, biomass.

### 1. Giriş

Dünya nüfusundaki artış, ekonominin gelişmesi, kentsel gelişim, yaşam standartlarındaki yükselme, sanayileşme ve teknolojik gelişmelerin hızlanmasına eşdeğer olarak dünya enerji tüketimi de giderek hızlanmaktadır [1]. Enerji, sanayinin gelişmesi ile birlikte hayati öneme sahip ihtiyaçlardan biri haline gelmiştir.

\* Sorumlu yazar: tubaulum6743@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-3481-5171, <sup>1</sup> 0000-0002-9283-7654<sup>2</sup> 0000-0001-7603-7385

Aydınlatma sektöründe, üretimde, dönüşümünde, hayatın her alanında enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji konusunun önemli ölçekte ön plana çıkmasının ana nedenleri; iklim değişikliği, fosil kökenli yakıtların bilinçsiz kullanımı, kullanılan bu fosil yakıtların tükenebilir olması, sera etkisinin artması, ülkelerin enerji ihtiyacını karşılamak için rekabetçi bakış açısına yol açan enerji temini sorunu olarak belirlenmektedir [2]. Fosil yakıtlar sonlu kaynaklar olup tükenme tehlikesi ile karşı karşıya olurken, yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi ile birlikte hem talep edilen enerji sağlanmakta hemde çevreci, temiz enerji yöntemleri kullanılarak enerji üretimi yapılmaktadır. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin azaltılması ve önlenmesi de sağlanabilecektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bu özelliği nedeni ile tercih edilmesi önem arz etmektedir [3]. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan biyokütle, enerji kaynaklarından elde edilen yakıtlardan birisi de biyogazdır. Biyogaz enerjisi çevre ve sağlık sorunlara yol açan organik atıkların işlenerek zararsız hale getirilmesi ve oluşan bu atıkların enerjiye dönüştürülmesini sağlayan teknolojilerden biridir. Yenilenebilir enerji üretiminde en ön sırada yer almaktadır [4].

Biyogaz hayvansal veya bitkisel organik atıklı hammaddelerden elde edilmektedir. Ayrıca biyolojik atıklar, gıda sanayi kaynaklı organik atıklar, mısır veya şeker pancarı gibi endüstri bitkileri ile hayvan besiciliğinde oluşan hayvansal dışkıları biyogaz tesislerinde hammadde olarak kullanılabilir [5]. Biyogaz, doğalgaz veya LPG (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı) ile çalışan birçok cihazda, küçük modifikasyonlar yapılarak rahatlıkla kullanılabilir [6]. Küresel ısınmanın önemli etkenlerinden biri olan sera gazlarının miktarlarının azaltılması önemlidir. Metan küresel ısınmaya neden olan en önemli gazlardan biridir. Hayvansal atıklardan yayılan metan gazı aynı hacimdeki CO<sub>2</sub>'den yirmi katı daha fazla sera gazı etkisine neden olmaktadır. Oysa biyogaz tesislerinde elde edilen metandan enerji eldesi oldukça avantajlıdır. Dolayısıyla biyogaz çevresel sorunlara neden olan şehirsel ve kırsal kesimdeki atıkların bertaraf ettiği için çevre dostu bir gaz görünümü oluşur [7].

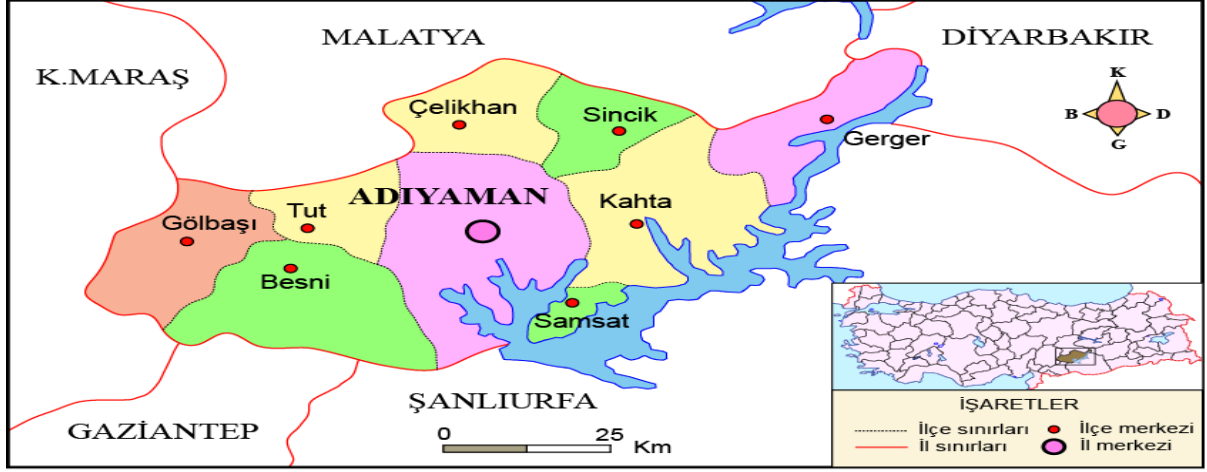
Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer alan bir diğer enerji kaynağı güneş enerjisidir. Güneş enerjisi tükenmez bir enerjidir. Temiz ve çevrecidir. İklim değişimi ve küresel ısınmaya etkisi minimumdur. Yılda 1.5 katrilyon ( $1.5 \times 10^{15}$ ) MW/h güneşten enerji elde etmek mümkündür [8]. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde güneş enerjisinden sonra, rüzgâr kaynağı önemli bir enerji kaynağıdır. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi rüzgâr türbinleri aracılığıyla elde edilmektedir. Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın 2017 Enerji Faaliyeti Raporu'na göre Türkiye 1.387 MW RES (Rüzgâr Enerji Santrali) kuruluşu noktasında rüzgâr enerjisi sıralamasında Avrupa sıralamasında 3., dünya sıralamasında ise 7. konumda bulunmaktadır [9]. Jeotermal enerji ise; volkanik, magmatik ve aktif kırık sistemlerin etrafında oluşmaktadır. Yer kabuğunun farklı konum ve derinliklerindeki ısının meydana getirdiği; sıcak su, gazların ve sıcak buharların tamamına jeotermal enerji adı verilmektedir. Bu jeotermal kaynaklardan direkt veya dolaylı yollarla ısı ve elektrik üretimi sağlanır. Jeotermal enerji yenilenebilir, çevreci, temiz, sera etkisi düşüktür [10]. Bir diğer yenilenebilir enerji kaynağımız olan hidroelektrik enerji, Dünya'nın her yerinde yaygın olarak kullanılan suyun akış hızından yararlanılarak potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye çevrilmesi sonucu elde edilen bir enerji türüdür [11]. Hidroelektrik santraller elektrik üretimi dışında, suyun depolanması, sulama, sellerin önlenmesi gibi çeşitli amaçlar için de kullanılmaktadır. Ulusal bir enerji kaynağıdır. Sera gazının oluşmasına ve küresel ısınmaya neden olmaz. Rüzgârın neden olduğu büyük su kütlelerinin hareketinin oluşturduğu potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesine dalga enerjisi denilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde yer alan dalga enerjisi dalga açısından zengin, açık denizlerde, körfezlerde ve kıyılara kurularak elde edilir. Tükenmeyen, sürdürülebilir özellikleri olan enerji kaynağıdır [12]. Ülkemizin enerji ihtiyacının sağlanması, enerji noktasında dışa bağımlılığını en aza indirgeyebilmesi, yerli, güvenilir bir enerjiden faydalanması açısından yenilenebilir enerji son derece önemlidir [13].

Bu çalışmada, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan ve hem tarım açısından hem de Türkiye'de önemli bir şehir olan Adıyaman'ın yenilenebilir enerji potansiyelinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsam neticesinde tek tek tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının (Güneş, Rüzgâr, Hidroelektrik, Biyogaz Enerjileri) il düzeyindeki potansiyeli ve mevcut kullanım durumları ortaya çıkartılmaya çalışılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

Adıyaman ili coğrafi konumu nedeni ile Doğu Anadolu Bölgesi ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi arasında geçiş vazifesi gören bir şehirdir. Bu da Adıyaman'ın Orta Fırat bölümü içinde yer aldığını göstermektedir. Adıyaman ilinin Kuzey noktasında Malatya ili, Batı noktasında Kahramanmaraş ili, Güneydoğu noktasında Şanlıurfa ili Güneybatıda Gaziantep, Doğuda ise Diyarbakır ili bulunmaktadır. Adıyaman ilçesinin bir kısmı Doğu Anadolu Bölgesinin içerisinde, diğer kısmı ise Akdeniz Bölgesi içerisinde yer almaktadır. Bu sebepten dolayı Adıyaman ili coğrafi durumu nedeniyle dört mevsimi yaşayan bir ilimizdir. Tarih boyunca birçok medeniyete ev sahipliği yapan Adıyaman ili Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır. Adıyaman ili; 39

derece doğu boylamı, 37 derece 25 dakika ile 38 derece 11 dakika kuzey enlemi, 37 derece ve arasında yer almaktadır. Yüzölçümü 7.614 km<sup>2</sup> olan Adıyaman İli gölleri ile beraber 7.871 km<sup>2</sup> olup, rakım değeri ise 669 m'dir [14]. Şekil 1'de Adıyaman ili ve ilçelerini gösteren bir harita verilmiştir.



Şekil 1. Adıyaman il ve ilçeleri [15].

Bu çalışmada, Adıyaman ili için Bepa yazılım programı kullanılarak ilk önce Adıyaman ilinin yüz ölçümü ve kullanılacak alan belirlendi. Daha sonra Bepa yazılım programı ve TÜİK verileri kullanılarak Adıyaman ve ilçelerinin 2019 yılı büyükbaş, küçükbaş, kanatlı kümes hayvan sayıları bulundu. Hayvansal atıklardan elde edilecek gübre miktarı tespit edilerek oluşacak biyogaz enerji miktarının belirlenmesi için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar yapılmadan önce bazı kabuller yapılmıştır. Ergür ve Okumuş göre ve EİE (Elektrik İşleri Etüd İdaresi)'den alınan veriler dahilinde biyogaz enerji potansiyelini belirlemek için aşağıdaki formüller kullanılmıştır [16]. Bu kabuller ile ilgili detaylı bilgiler aşağıdaki Tablo1, Tablo2 ve Tablo3'te verilmiştir.

**Tablo 1.** Hayvan türlerinin ürettiği gübre miktarı [17].

Hayvan Adedi	Hayvan Kaynağının Cinsi	Gübre Miktarı (ton/yıl)
1	Büyükbaş Hayvanı	3.6
1	Küçükbaş Hayvanı	0.7
1	Kanatlı Kümes Hayvanı	0.002

**Tablo 2.** Birim hayvan gübresi başına birim biyogaz üretimi [17].

Gübre Cinsi	Gübre Miktarı(ton)	1ton Gübreden Elde Edilen Biyogaz (m <sup>3</sup> /yıl)
Büyükbaş Hayvanı	1	33
Küçükbaş Hayvanı	1	58
Kanatlı Kümes Hayvanı	1	78

**Tablo 3.** Hayvan türüne göre kuru gübre katsayıları [17].

Hayvan Cinsi	Kuru Gübre Katsayısının Oranı (%)
Büyükbaş Canlı Hayvan	65
Küçükbaş Canlı Hayvanı	13
Kanatlı Kümes Hayvanı	99

1m<sup>3</sup> biyogaz ortalama 4,700-5,700 kcal/m<sup>3</sup> ısı sağlayabilmektedir [17]. Biyogazın elektrik enerjisi olarak eşdeğerinin kabulü ise; EİE, Akbulut, Dikici'ye göre "1 m<sup>3</sup> biyogazın elektrik eşdeğeri 4,70 kWh'dir [18]. Verilere bağlı olarak Adıyaman ilinin 2019 yılı büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı kümes hayvanı sayısına göre biyogaz, hayvansal gübre ve birim enerji eşdeğeri hesaplanmıştır.

### Karbon Salınımı

Adıyaman ilinin biyogaz enerji potansiyelini elde edebilmek için elektrik enerjisi sonucunda karbon salınımının düşürülmesi noktasında küresel ısınmanın yaratacağı tehlikelerinde azaltılması mümkün olacaktır. Biyogaz enerjisinin bileşenleri; Metan (CH<sub>4</sub>), Hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), Karbondioksit (CO<sub>2</sub>), Azot (N<sub>2</sub>), Amonyak (NH<sub>3</sub>), Su (H<sub>2</sub>O), Hidrojen (H<sub>2</sub>), olarak toplam yedi bileşenden oluşmaktadır [19]. Elektrik tüketimine bağlı olarak karbon salınımı, elektrik tüketimi ve emisyon faktörünün çarpılmasıyla elde edilebilir. Emisyon faktörü değerleri üretilen elektrik miktarına bağlı olarak, birim emisyon değerinin üretilen toplam elektrik enerjisi miktarıyla belirlenebilir [20]. Ancak aşağıdaki formülde sadece CO<sub>2</sub>'in salınım miktarını hesaplanmaktadır. Türkiye için birim kWh ve üretime bağlı salınım değeri '0.865664547' kg CO<sub>2</sub> olarak tespit edilmiş olup salınım değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır [18].

$$\text{Salınım Değeri (kgCO}_2\text{)} = \text{Üretilen Elektrik Enerjisi (kWh)} \times 0.865664547 \quad (1)$$

Adıyaman ilinin güneş enerji kaynakları potansiyeli için Solar Med Atlası yazılımı kullanılmıştır. Solar Med Atlas yazılımı ile ülkelerin ve illerin meteoroloji istasyonları noktasından, dünyadaki gözlem uydu verilerinin işlenmesinden veriler elde edilmektedir [19]. Hidroelektrik enerji kaynakları potansiyeli için Adıyaman DSİ (Devlet Su İşleri) İl Müdürlüğünden veriler alınmıştır. Toplamda 15 adet HES (Hidroelektrik Enerji Santrali) bulunduğu tespit edilmiş ve 15 adet HES'lere gidilerek veriler elde edilmiştir. Rüzgâr enerji kaynaklarının potansiyelinin belirlenmesi amacıyla Adıyaman Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğünden gerekli raporlar alınarak bilgi sağlanmıştır. Daha sonra belirtilen Sincik Rüzgâr Enerji Santrali ziyaret edilerek üretilen enerji miktarı tespit edilmiştir.

### 3. Bulgular

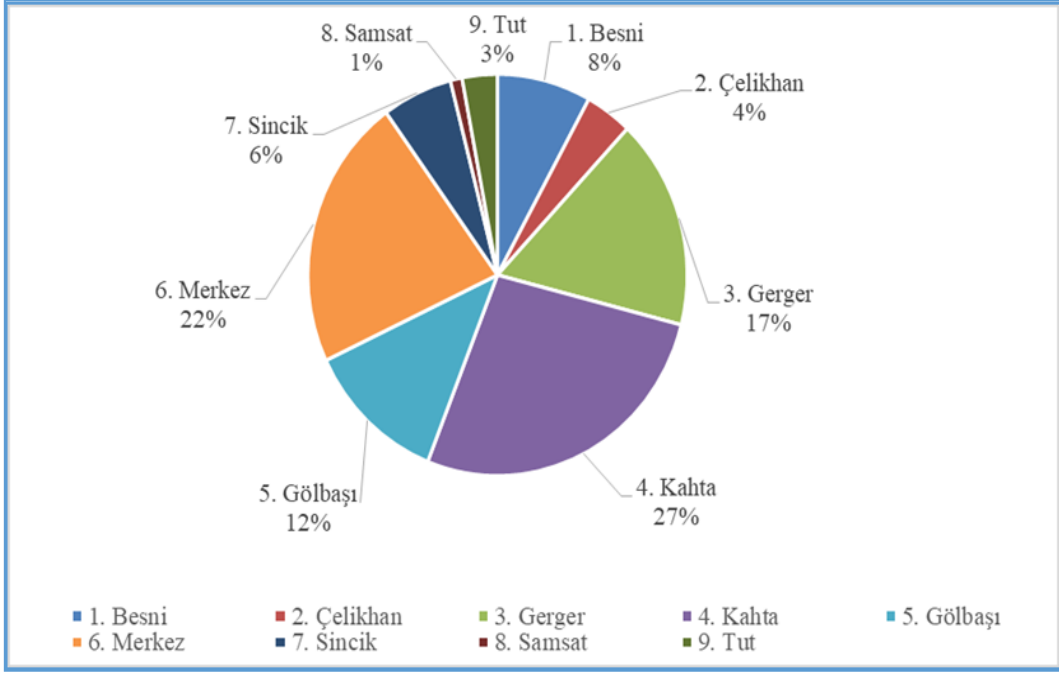
Adıyaman ili ve ilçeleri için 2019 yılı büyükbaş, küçükbaş ve kanatlı kümes hayvan sayıları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te görüldüğü üzere toplam büyükbaş hayvan sayısı 91.771, toplam küçükbaş sayısı 297.730 toplam kanatlı kümes hayvan sayısı ise 278.939 olarak tespit edilmiştir.

#### 3.1. Biyogaz potansiyeli ve enerji eldesi

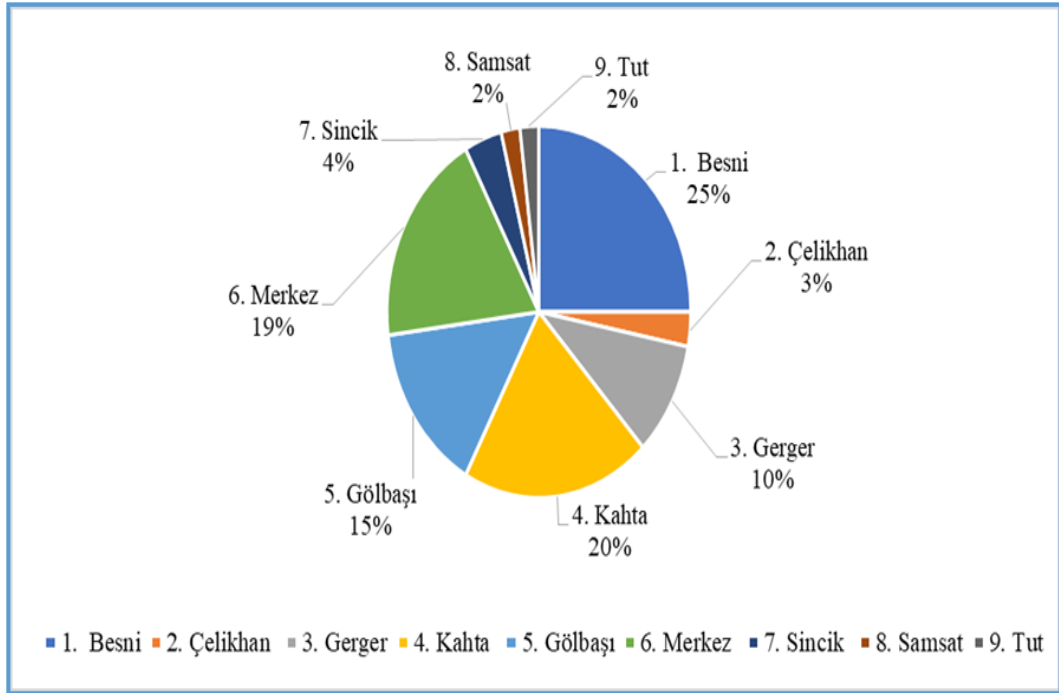
**Tablo 4.** Adıyaman ilinde bulunan mevcut hayvan sayılarının dağılımları [21].

İlçe Adı	Büyükbaş Hayvan	Küçükbaş Hayvan	Kanatlı Kümes Hayvanı
	Sayısı (Adet)	Sayısı (Adet)	Sayısı (Adet)
Merkez	20.075	55.266	46.140
Kahta	24.690	59.359	94.180
Besni	7.184	74.448	16.955
Gölbaşı	11.600	45.800	84.847
Gerger	16.139	29.765	7.360
Sincik	5.450	12.340	7.700
Çelikhan	3.323	8.275	650
Tut	2.622	7.403	8.207
Samsat	688	5.074	12.900
<b>TOPLAM</b>	<b>91.771</b>	<b>297.730</b>	<b>278.939</b>

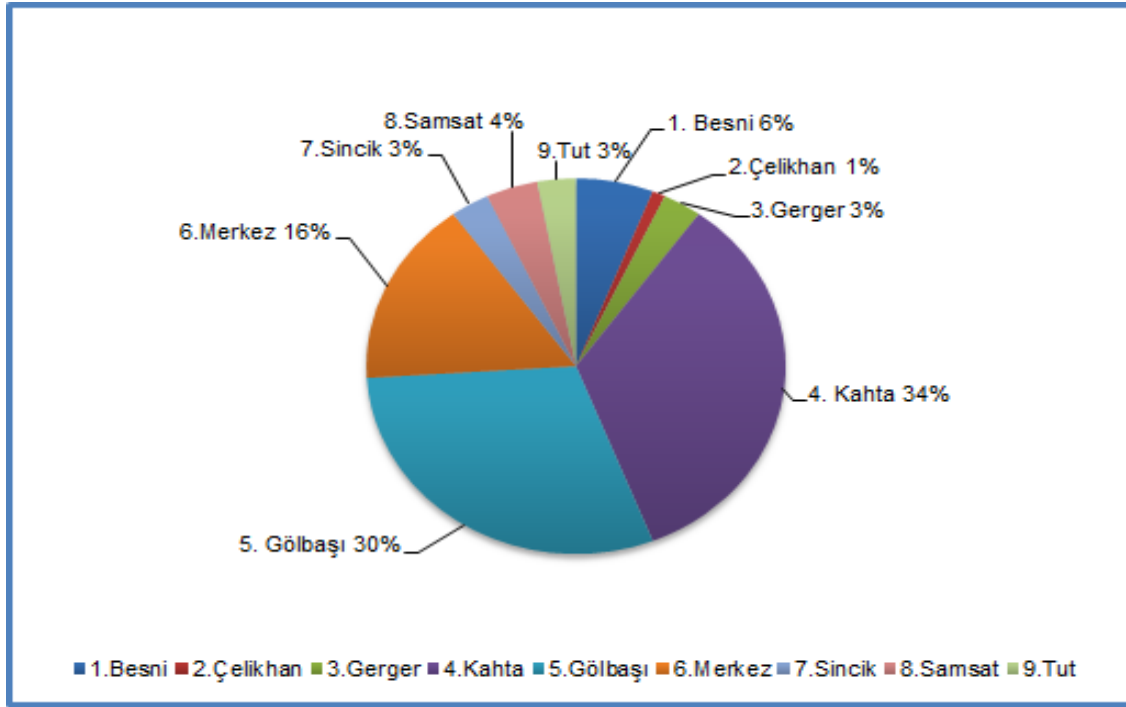
Adıyaman ilinin geçim kaynakları arasında hayvancılığın önemi ve mevcut hayvan sayıları göz önüne alınırsa biyogaz enerji üretimi için potansiyeli mevcuttur. Bu potansiyeli kaynak olarak kullanılacak olan hayvanların atık ve artık miktarları belirlenmektedir. Adıyaman İli büyükbaş canlı hayvanların yüzdelik miktarları ilçelere göre dağılımı Şekil 2'de, küçükbaş canlı hayvanların yüzdelik olarak dağılımı Şekil 3'te, kanatlı kümes hayvanlarının yüzdelik olarak ilçelere göre dağılım modeli ise Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 2. Adıyaman ili büyükbaş canlı hayvanların yüzdeler olarak ilçelere dağılımı



Şekil 3. Adıyaman ili küçükbaş canlı hayvanların yüzdeler olarak ilçelere dağılımı



Şekil 4. Adıyaman ili kanatlı kümes hayvanların yüzdelik olarak ilçelere göre dağılımı

Şekilleri irdelendiğinde Adıyaman ili biyogaz enerji üretimi için gerekli olan potansiyel yoğunluğun büyükbaş hayvanlarda %27'lik kısmı Kahta ilçesinde, %25'lik kısmı küçükbaş hayvanlar için Besni ilçesinde ve kanatlı kümes hayvanlarında ise %34'lük kısmı yine Kahta ilçesinde yer aldığı görülmektedir. Adıyaman ilindeki canlı hayvanların sayısı belirlendikten sonra mevcut bulunan hayvanların yıllık ortalama atık gübre miktarları hesaplanmıştır. Tablo 5'te ilçelere göre yıllık ortalama atık gübre miktarları verilmiştir.

Tablo 5. Adıyaman ilinde oluşacak hayvansal atıkların hayvan cinslerine ve ilçelere göre dağılımı

İlçe Adı	Büyükbaş Canlı H. Atık Atık Miktarı (ton/yıl)	Küçükbaş Canlı H. Atık Miktarı (ton/yıl)	Kanatlı H. Atık Miktarı(ton/yıl)
Merkez	72.270	38.686	10.150
Kahta	88.884	41.551	20.719
Besni	25.862	52.113	3.730
Gölbaşı	41.760	32.060	18.666
Gerger	58.100	20.835	1.619
Sincik	19.620	8.638	1.694
Çelikhan	11.962	5.792	14.3
Tut	9.439	5.182	18.055
Samsat	2.476	3.551	2.838
<b>TOPLAM</b>	<b>330.373</b>	<b>208.408</b>	<b>68.290</b>

Adıyaman ili merkez ve sekiz ilçesinin biyogaz enerji miktarı incelendiğinde, en yüksek oranın Kahta ve Merkez ilçelerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, Adıyaman ilinde büyükbaş canlı hayvanlardan yıllık toplam 330.373 ton, küçükbaş canlı hayvanlardan 208.408 ton, kanatlı hayvanlardan 68.290 ton atık elde edilmektedir. Tablo6'da Adıyaman ilinde hayvansal atıkları sonucunda oluşan enerji değeri verilmiştir.

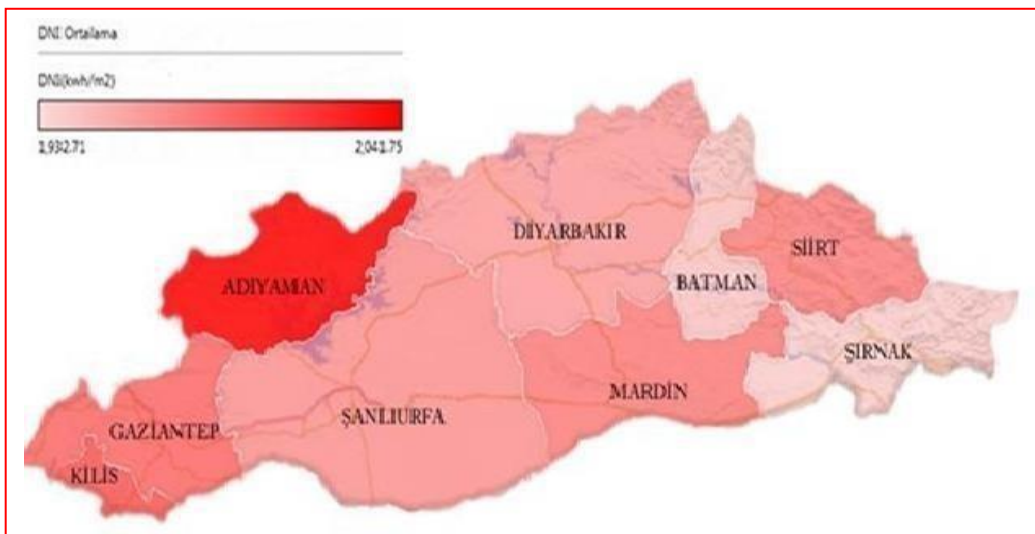
**Tablo 6.** Adıyaman ilinin hayvansal atıkları sonucunda oluşan enerji değeri analiz sonuçları

Hayvan Cinsi	Gübre Miktarı (ton/yıl)	Biyogaz Miktarı (m <sup>3</sup> /yıl)	Elde Edilebilecek Biyogaz (m <sup>3</sup> /gün)	Elektrik Enerjisi Eşdeğeri (kWh/gün)	Yıllık Elektrik Enerjisi (kWh)
Büyük Baş Hayvanlar	330.373	10.902.309	29.869	140.384	512.401
Küçük Baş Hayvanlar	208.408	12.087.664	33.116	155.645	568.104
Kanatlı Kümes Hayvanları	68.290	5.326.620	14.593	68.587	250.342
<b>Toplam</b>	<b>670.071</b>	<b>29.036.593</b>	<b>77.578</b>	<b>346.616</b>	<b>1.330.847</b>

Tablo 6 incelendiğinde, hayvansal atıkların toplam gübre miktarı 670.071 ton/yıl, tüm hayvan cinslerinden oluşan toplam biyogaz miktarı ise 29.036.593 m<sup>3</sup>/yıl' dır. Hayvansal atıklardan elde edilebilecek toplam biyogaz miktarı ise 77.578 m<sup>3</sup>/gün ve elektrik enerjisi eşdeğeri ise toplam 346.616 kWh/gün olarak hesaplanmıştır. Adıyaman ilinde bulunan mevcut enerji potansiyeli ilçe bazlarında incelendiğinde Merkez ve sekiz ilçesinde hayvansal atıklardan toplam 1.330.847 kWh yani diğer bir ifade ile 1.330 MW/yıl elektrik enerjisi üretilebilecek potansiyelinin olduğu tespit edilmiştir. Karbon salınımının azaltılması, fosil kökenli yakıtların kullanımının artması sonucunda oluşan karbon salınımı da artarak ciddi bir tehlike oluşturmaktadır. Bu yüzden biyogaz enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılması, elektrik enerjisinin üretiminin yapılmasının yanı sıra karbon salınımının da azaltılmasına yardımcı olmaktadır. Adıyaman ilinde mevcut şartlar altında yapılan biyogaz enerji ile elektrik üretim yılda 1.330.847 kWh olup elektrik üretimine bağlı karbon salınım azalımı değeri ise 1.152.067 ton-CO<sub>2</sub> olarak hesaplanmıştır. Biyogaz ile üretilecek enerji miktarı Adıyaman ili ve ilçelerinin yıllık enerji miktarının dörtte birlik kısmını karşılayacak kapasite olduğu tespit edilmiştir.

### 3.2. Güneş enerjisi potansiyeli ve eldesi

Adıyaman İli, bulunduğu konumu itibarıyla sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından bölgede bulunan birçok bölgeye göre avantajlı durumdadır. Solar Med Atlas yazılımından elde edilen il ve bu illere ait ilçelerin DNI (Direk Işınım Değeri) ve GHI (Global Işınım Değeri) güneş ışınım verileri incelenerek Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin ışınım değerlerinin gösterimi verilmektedir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin direkt ışınım değerleri haritası Şekil 5'te aşağıda verilmektedir. Güneydoğu Anadolu Bölgesinde DNI ortalaması 2.041 kWh/m<sup>2</sup>/yıl ile 1.932 kWh/m<sup>2</sup>/yıl değerleri arasında yer almaktadır.

**Şekil 5.** Güneydoğu anadolu bölgesinin DNI potansiyeli haritası [22].





Şekil 6. Güneydoğu anadolu bölgesinin yatay GHI potansiyeli haritası [22].

Bu verilere göre en yüksek GHI değeri Adıyaman ilinde ve en düşük ışınım değeri ise Batman ilinde olduğu görülmektedir. Şekil 7’de Adıyaman iline ait güneş enerjisi haritası verilmiştir.



Şekil 7. Adıyaman güneş enerji potansiyeli atlası [23].

Şekil 7’i incelendiğinde Adıyaman ilinin yüksek güneş enerjisi potansiyeli bulunmakta olup kuzey kesim noktalarına gidildikçe bu potansiyel değerinin arttığı görülmektedir. Adıyaman ilinin ortalama güneş ışınımı değerinin yaklaşık olarak 1.600-1.700 arasında olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu değerler kWh/m<sup>2</sup> olarak bir yılda alınabilecek toplam enerji miktarını ifade etmek için kullanılmaktadır. Adıyaman İlinin ortalama güneşlenme süresinin en yüksek olduğu Temmuz ayında 12.25 saat iken en düşük 4.01 saat ile Aralık ayında ölçülmüştür.

Adıyaman’ın ilinin yıllık ortalama güneşlenme süresi 8.11 saat olarak tespit edilmiştir. Adıyaman ili toplam güneş radyasyonunun en çok kaydedildiği ay Haziran ayıdır. Adıyaman ili gerek güneşlenme süresi gerekse güneş radyasyonu ortalamalarında Türkiye ortalamasının üzerindedir. Türkiye geneli toplam güneş radyasyonu Haziran ayında 6.57 kWh/m<sup>2</sup> gün iken Adıyaman ilinde bu değer 6.82 kWh/m<sup>2</sup> gün olarak gerçekleşmektedir. Adıyaman ilinde aktif olarak kurulu güneş enerji santralleri toplamda 12 adettir. Tablo 7’de detaylı olarak

gösterilmektedir. Tablo 8'i incelediğimizde Adıyaman ilinde toplam on iki adet aktif güneş enerji santrali bulunmaktadır. Bunların altı adedi Adıyaman Merkez'inde, dört adedi Gölbaşı ilçesinde, iki adedi de Kahta ilçesinde yer almaktadır. Adıyaman ilinde 10.3 MW kurulu gücünde güneş enerjisi sistemleri kurulmuş olup faaliyetlerine devam etmektedir. Adıyaman ili için yapım aşaması noktasında iki adet GES (Güneş Enerji Santrali) bulunmaktadır. Bunlar Besni Belediyesi ve Besni Şahin Halıgür firmalarına ait kurulu gücü ise 0,81 MW ve 0.47 MW olarak toplamda 1.28 MW olarak yapılmaktadır. Aynı zamanda yapılması planlanan Desun GES santrali 2.05 MW olarak enerjiye katkı sağlanması düşünülmektedir.

**Tablo 7.** Adıyaman ili aktif güneş enerji santralleri

SANTRAL ADI	İLÇE	FİRMA	KURULU GÜÇ (MW)
DSI Adıyaman GES	Merkez	DSI	2,00
SEVA GES	Kahta	SEVA	1,00
Adıyaman Gölbaşı GES	Gölbaşı	Ahmet Dağılımş	1,00
Ecoturco Adıyaman GES	Merkez	Ecoturco	0,99
Dehlevi Petrol Adıyaman GES	Kahta	Dehlevi Petrol Harfiyat	0,99
Kaplan GES	Merkez	Gafur Kaplan	0,94
Akmkent GES	Gölbaşı	Akmkent Enerji	0,50
Dağpen Plastik Adıyaman GES	Gölbaşı	Dağpen Plastik	0,50
Cihan PVC Adıyaman GES	Gölbaşı	Cihan PVC İNŞ.	0,47
GTC Dış Ticaret GES	Merkez	GTC Dış Ticaret	0,40
Akbulgur Gıda GES	Merkez	Akbulgur Gıda	0,38
Tekyılmaz Gıda GES	Merkez	Tekyılmaz Gıda	0,19
<b>TOPLAM</b>			<b>10,3 MW</b>

### 3.2. Rüzgâr enerjisi potansiyeli ve eldesi

Adıyaman ilinin rüzgâr enerji potansiyelini incelediğimizde Tablo 8'de görüleceği üzere sürekli devam etmesi ile yenilenebilir, çevre açısından temiz bir enerji kaynağı durumundadır. Adıyaman ilinin ortalama rüzgâr hızı 2.4 m/sn.dir [24]. RES (Rüzgâr Enerji Santrali) yatırım sistemlerinin ekonomik olarak çalışabilmesi için 7 m/s ya da üzerinde rüzgâr hızı gerekmektedir. Adıyaman'ın kuzey bölgelerinde ise, Gölbaşı, Tut, Sincik, Çelikhan ve Adıyaman Merkezinin kuzeyi 6.5-7 m/s hız sınırı aralığındadır.

**Tablo 8.** Adıyaman iline kurulabilecek rüzgâr enerji santralinin güç kapasitesi

Ortalama 50 m'de Rüzgâr Gücü (W/m <sup>2</sup> )	Ortalama 50 m'de Rüzgâr Hızı(m/s)	Toplam Alan(km <sup>2</sup> )	Toplam Kurulu Güç (MW)
300-400	6.8- 7.5	176.32	881.6
400-500	7.5- 8.1	50.96	254.8
500-600	8.1- 8.6	12.1	60.48
600-800	8.6-9.5	0	0
>800	>9.5	0	0
<b>TOPLAM</b>		<b>239.38 km<sup>2</sup></b>	<b>1.196.88 MW</b>

Tablo 8'i incelediğimizde Adıyaman İlinde rüzgâr enerji santrali toplam 239.38 km<sup>2</sup>'lik bir alana kurulabilir ve toplam kurulu güç kapasitesinin ise 1.196.88 MW olduğu tespit edilmiştir. Adıyaman'ın batı ve kuzey kesimi rüzgâr enerjisi açısından yeterli potansiyele sahiptir ve yatırım yapılabilir yerler olarak yatırımcılara firmalara fırsatlar sunmaktadır. Adıyaman'ın kuzey doğusunda yer alan Sincik ilçesinin rüzgâr enerji santrali kurulması doğrultusunda uygun bir yer olduğu görülmektedir. Adıyaman'ın Sincik ilçesinin Alancık bölgesinde kurulu Sincik Rüzgâr Enerji Santrali bulunmaktadır.



**Şekil 8.** Adıyaman Sincik rüzgâr enerji santrali

Sincik Rüzgâr Elektrik santrali 25 MW kurulu gücü ile Adıyaman ilinin 5., Türkiye' nin ise 362. büyük enerji santralidir. Sincik RES'te 11 adet Rüzgâr Türbini kullanılmıştır. Santral ortalama 63.217.619 kilovatsaat elektrik üretimi gerçekleştirmektedir. Aynı zamanda 19.099 kişinin günlük hayatında (konut, sanayi, metro ulaşımı, resmi kurum, çevre aydınlatması vb.) ihtiyaç duyduğu tüm elektrik enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Sincik Rüzgâr Santrali sadece konutların elektrik tüketimi dikkate alındığı takdirde ise 20.069 konutun elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilecek potansiyeli bulunmaktadır.

Adıyaman ili hidrolik enerji kaynakları bakımından oldukça zengin bir potansiyele sahip ilimizdir. Adıyaman ilinde 15 adet Hidroelektrik Enerji Santrali (HES) bulunmaktadır. Bu HES'lerin toplam kurulu gücü 214.756 MW faaliyet göstermektedir. Tablo 9'da Adıyaman ilinde bulunan HES'ler, yerleri ve kurulucu güçleri detaylı olarak verilmektedir. Tablo 9'u incelediğimizde 4 adedi Besni ilçesinde, üç adedi Sincik ilçesinde 2'şer adedi Gölbaşı, Çelikhan ve Tut ilçesinde, bir adet Merkez de bir adedi ise Kahta ilçesinde bulunmak üzere toplam kurulu HES'i onbeş tane dir. Toplam üretilen enerji 214.756 MW olarak hesaplanmaktadır. Bu HES'lerin yıllık ortalama enerji üretimi toplam 762.72 GWh/ yıl'dır. Kahta ilçesinde yapımına onay verilen Karakuş HES'in ise kurulu gücü 8.94 MW olarak bilinmektedir. Bununla beraber toplam on altı adet HES ve kurulu gücü 223.696 MW olarak ilin enerjisine katkı sağlanmaktadır.

**Tablo 9.** Adıyaman ilinde bulunan HES'ler ve ortalama gücü

HES ADI	İLÇE	KURULU GÜCÜ (MW)
Besni HES	Besni	0,272 MW
Bulam HES	Çelikhan	7,03 MW
Burç Bendi HES	Besni	27,9 MW
Çağlayan HES	Sincik	10,26 MW
Doğankaya HES	Tut	20,55 MW
Erkenek HES	Gölbaşı	13,028 MW
Gemiciler HES	Gölbaşı	8,40 MW
Kahta HES	Kahta	7,726 MW
Kaleköy HES	Besni	2,82 MW
Kandi HES	Sincik	16,342 MW
Koruköy HES	Merkez	3,03 MW
Pınar HES	Tut	30,09 MW
Sırımtaş HES	Sincik	27,934 MW
Şifrin HES	Çelikhan	6,744 MW
Murat HES	Besni	35,63 MW
<b>TOPLAM</b>		<b>214,756 MW</b>

Aynı zamanda yapılması planlanan, proje aşamasında olan Koçalı HES 38.6 MW kurulu güç ile 98.75 GWh yıllık enerji üretilmesi planlanmaktadır. Bu proje ile beraber ilin içme suyu ihtiyacının karşılanması, Adıyaman ile Kahta ilçesi arasındaki 18.119 ha kalan arazilerin sulanması ve büyük miktarda enerji ihtiyacının karşılanması öngörülmektedir. Adıyaman ili toplam 214.756 MW elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir.

#### 4. Sonuç

Adıyaman ili için yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli detaylı olarak araştırılmıştır. Adıyaman ili, tarım ve hayvancılığın aktif olarak yapıldığı illerimizden biri olmasından dolayı biyogaz yatırımlarının cazip olacağı illerden biridir. Bu çalışma da hayvansal kökenli atıklardan elde edilebilecek biyogaz potansiyeli ve bu potansiyelin alansal dağılımı Bepa yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Bu yazılım ile ilk olarak büyükbaş, küçükbaş, kanatlı kümes hayvanları Adıyaman Merkez ve sekiz ilçesi için hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda büyükbaş canlı hayvan sayısının 91.771 adet, küçükbaş canlı hayvan sayısının 297.730 adet ve kanatlı kümes hayvanının ise toplam 278.939 adet olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra hayvansal atıklar tablolar halinde verilmiş ve bulunan mevcut hayvansal atıklardan oluşabilecek biyogaz atık miktarından teorik olarak elde edilebilecek elektrik enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalara göre, ilde bulunan atıklardan teorik olarak elde edilecek biyogaz potansiyeli 29.036.593 m<sup>3</sup>/yıl'dır. Yine bu potansiyele dayalı teorik olarak üretilebilecek elektrik potansiyeli 346.616 kw-h/gün ve yıllık 1.330.847 kw/h'dir. İl genelinde hayvansal kökenli atıklarından elde edilebilecek gübre miktarı ise 670.071ton/yıl olarak tespit edilmiştir. Daha sonra Solar Med Atlas yazılımı ile bölgedeki il ve ilçelerin DNI ve GHI güneş ışınım değerleri incelendi. Bu incelenmeler neticesinde Adıyaman ilinin güneşlenme süresi 2.961 saat/yıl ve 1.595 kwh/m<sup>2</sup>yıl Türkiye ortalamasından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. İl ve ilçelerin yer aldığı, direk normal ışınım değerlerinde ise en yüksek Adıyaman ilinde en düşük ise Batman olduğu belirlenmiştir. Adıyaman ilinde en fazla güneşlenme süresi Temmuz ayında gerçekleşirken, en az güneşlenme süresi Aralık ayında gerçekleşmektedir. Adıyaman ilinde aktif olarak faaliyet gösteren on iki adet GES bulunmakta ve toplamda 10.3 MW kurulu gücü bulunmaktadır. Rüzgâr Enerji Potansiyeli Atlası (REPA) kullanılarak rüzgâr enerji potansiyeli belirlendi. Daha sonra Adıyaman iline kurulabilecek rüzgâr enerji santrali gücü tablo halinde verilerek toplam kurulu güç kapasitesinin 1.196.88 MW ile 239.38 km<sup>2</sup> bir alan olduğu tespit edilmiştir. Adıyaman ili hidroelektrik enerji kaynakları bakımından oldukça zengin bir noktada yer almaktadır. Adıyaman ilinde mevcut olarak faaliyet gösteren 15 adet HES bulunmaktadır. HES'ler toplam 214.756 MW Kurulu gücü ile Adıyaman iline katkı sağlamaktadır. Adıyaman genelinde hidroelektrik santraller içme suyunun karşılanmasının yanı sıra gerek arazilerin sulanmasında gerek enerji ihtiyacının karşılanmasında bölgeye katkı sağlamaktadır. Adıyaman ili jeotermal, dalga ve hidrojen enerjisinden enerji elde noktasında yetersiz kaldığı mevcut koşullarda potansiyelinin bulunmadığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak; Adıyaman ilinin toplam yenilenebilir enerji potansiyeli güneş, rüzgâr, hidroelektrik enerjisinden toplam 251.252 MW/ yıl, iken biyogaz enerji potansiyelinden teorik olarak üretilebilecek yıllık elektrik enerjisi 1.330 MW/yıl'dır. Toplam yenilenebilir enerjiden sağladığı enerji miktarı ise; bir yılda 252.582 MW/yıl'dır. Bu sonuçlar neticesinde Adıyaman ili için Güneş enerjisi, daha sonra Hidroelektrik enerjisi, Biyokütle enerjisi ve en son olarak da Rüzgâr enerjisinin kullanılmasının daha faydalı olacağı tespit edilmiştir.

#### Kaynaklar

- [1]. [1] Görgülü S, 2019. Burdur İlinin Hayvansal ve Bazı Tarımsal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi, El-Cezeré Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(3), (543-557), 2019.
- [2]. [2] Adıyaman Ç, Türkiye'nin Yenilenebilir Enerji Politikaları. Niğde Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde, 163s, 2012.
- [3]. [3] Öden T, Çağdaş F. ve Tüzün N, 2009. 5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu. Diyarbakır, 225s.
- [4]. [4] Avcıoğlu O, Türker U, Atasoy D, Koçtürk D, Tarımsal Kökenli Yenilenebilir Enerjiler Biyoyakıtlar. Nobel Akademik Yayıncılık, 2011.
- [5]. [5] Çetinkaya H. 2016. Biyogaz. Fırat Kalkınma Ajansı, Yenilenebilir Enerji Projeleri.
- [6]. [6] Gürel A, Tekirdağ İlinin Keşfedilmeyen Değerlerinden Biyogaz Potansiyeli, Tekirdağ Değerleri Sempozyumu, Ege Basım, Ataşehir- İstanbul, 62-75s. 2010.
- [7]. [7] Tolay M, Yamankaradeniz H, Yardımcı S, Reiter R, Hayvansal Atıklardan Biyogaz Üretimi, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, UTES, İstanbul, 2008.
- [8]. [8] Karaca, C., Güneş ve Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretimi Sistemi Tasarımı. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 114s, 2012.
- [9]. [9] Güneş, M.A., 2009. Türkiye'nin Enerji Sorunu İçin Alternatif Çözüm Önerileri ve Rüzgâr Enerjisinin Önemi. Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aydın, 121s.

- [10]. [10] Yılmaz, Ö., 2016 Enerji Ekonomi Politliğinde Yenilenebilir Enerjinin Değişen Rolü ve Türkiye Açısından Önemi. İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir, 136s.
- [11]. [11] Karagöl, İ.T. ve Kavaz, İ., 2017. Dünyada ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Analiz, 197s.
- [12]. [12] Akkurt Ş, Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Çevresel Etkileri ve Kayseri Örneği. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 123s, 2016.
- [13]. [13] Tunçez, F, 2018. Ereğli Biyogaz Potansiyelinin Belirlenmesi, Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi, Sayı 1(1):17.
- [14]. [14] Adıyaman ili 2019 yılı çevre durum raporu, Adıyaman Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü, 2019. [https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Adıyaman\\_icdr2016\(1\).pdf](https://webdosya.csb.gov.tr/db/ced/editordosya/Adıyaman_icdr2016(1).pdf).
- [15]. [15] <http://www.cografyaharita.com>.
- [16]. [16] Ergür O, ve Okumuş F, Cost and Potential Analysis of Biogas in Eskişehir. Uludağ University, Journal of The Faculty of Engineering, Bursa, 6s, 2010.
- [17]. [17] Elektrik İşleri 13 Etüd İdaresi, 2019.
- [18]. [18] Akbulut A, ve Dikici A, Elazığ İli’ nin Biyogaz Potansiyeli Ve Maliyet Analizi. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi.2(2): 36-41, 2004.
- [19]. [19] Deviren H, İlkılıç C, ve Aydın S, Biyogaz Üretiminde Kullanılabilen Materyaller ve Biyogazın Kullanım Alanları Batman Üniversitesi, Yaşam Bilimleri Dergisi, 7(2): 2, 11s, 2017.
- [20]. [20] Brander M, Sood A, Wylie C, Haughton A, and Lovell J, Electricity-Specific Emission Factors for Grid Electricity,

## Fe elementindeki $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$ Katı-Katı Faz Geçişlerinin Moleküler Dinamik Benzetimi ile İncelenmesi

Sefa KAZANÇ<sup>1</sup>, Canan Aksu CANBAY<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi, Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23119, Elazığ/TÜRKİYE

<sup>2</sup>Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23119, Elazığ/TÜRKİYE

<sup>1</sup>skazanc@firat.edu.tr, <sup>2\*</sup>caksu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 15/09/2020;

Kabul/Accepted: 16/11/2020)

**Öz:** Fe elementinin faz diyagramı incelendiğinde erime sıcaklığının altında farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapılara sahip olduğu görülmektedir. Bu çalışmada 4000 atomdan oluşan Fe model sisteminde farklı sıcaklıklarda meydana gelen katı-katı faz dönüşümleri moleküler dinamik benzetim yöntemi kullanılarak incelenmeye çalışıldı. Çok cisim etkileşmelerini içeren Gömülmüş Atom Metodu(GAM) atomlar arasındaki etkileşmeleri hesaplamak için kullanıldı. Fe elementi için erime sıcaklığının altında oluşan  $\alpha$ ,  $\gamma$  ve  $\delta$  fazları ve bu fazlar için dönüşüm sıcaklıkları belirlenerek sonuçlar deneysel değerlerle karşılaştırıldı. Model sistemin yapısal analizlerinde radyal dağılım fonksiyonu, termodinamik niceliklerde değişimler ve Ackland-Jones analiz yöntemi kullanıldı. Erime sıcaklığına kadar olan faz geçişlerinin gözlenmesi, hesaplamalarda kullanılan potansiyel fonksiyonunun Fe'nin sistemin modellenmesinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Fe elementi, moleküler dinamik benzetimi, katı-katı faz dönüşümü, gömülmüş atom metodu.

### The Investigation with Molecular Dynamic Simulation of $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$ Solid-Solid Phase Transformation in Fe

**Abstract:** When the phase diagram of the element Fe is examined, it is seen that it has different crystal structures at different temperatures below its melting temperature. In this study, the solid-solid phase transformations occurring at different temperatures in the Fe model system consisting of 4000 atoms were investigated using molecular dynamic simulation method. The Embedded Atom Method(EAM), which includes many body interactions, was used to calculate interactions between atoms. For the element Fe, the  $\alpha$ ,  $\gamma$  and  $\delta$  phases formed below the melting temperature and the transformation temperatures for these phases were determined and the results were compared with the experimental values. Radial distribution function, changes in thermodynamic quantities and Ackland-Jones analysis method were used in the structural analysis of the model system.

**Keywords:** Element Fe, molecular dynamics simulation, solid-solid phase transformation, embedded atom method.

#### 1. Giriş

Sıcaklık ve basınç gibi dış etkenler maddelerin farklı denge fazlarında bulunmalarında oldukça etkili faktörlerdir. Bu duruma iyi bir örnek Fe elementi verilebilir. Fe farklı sıcaklıklarda farklı kristal yapılara sahip katı-katı faz dönüşümü sergileyen poliformik (çok şekilli) elementlerden biridir. Sıfır basınç değerinde 911 °C'ye kadar Fe bcc yapıya sahiptir. Bu yapıdaki Fe,  $\alpha$ -Fe olarak bilinmektedir. 911 - 1407 °C sıcaklık aralığında ise Fe elementi bir önceki yapıya göre daha sıkı paket yapıya sahip fcc birim hücreli yapıya dönüşür ve  $\gamma$ -Fe olarak adlandırılmaktadır [1, 2]. Fe için ve özellikle çelik için soğutma esnasında fcc yapıdan bcc yapıya faz dönüşümü (martensitik faz dönüşümü olarak adlandırılır) oldukça önem taşımaktadır [3]. Fe in erimesinden önce 1407 -1536 °C sıcaklık aralığında ise yeniden bcc faza bir dönüşüm gerçekleşmektedir. Bu faz da  $\delta$ -Fe olarak adlandırılmaktadır. Fe elementinin ısıtılması esnasında 768 °C'de bir dönüşüm daha meydana gelmektedir. Ancak bu sıcaklıkta kristal yapıda herhangi bir değişim meydana gelmemekte sadece bu sıcaklık değerinde Fe ısıtma veya soğutma esnasında kaybettiği manyetik özelliklerine yeniden kavuşmaktadır. Bu nokta Curie noktası olarak bilinmektedir [2, 4]. Faz geçişleri, malzemelerin mikro yapıları üzerinde önemli bir rol oynamakta ve böylece akma dayanımı ve sertlik gibi materyallerin makroskobik özellikleri kontrol edilebilmektedir. Fe elementinde meydana gelen bu katı-katı faz dönüşümü büyük bir öneme sahiptir ve Fe elementindeki katı-katı faz geçişlerinin incelenmesi için birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan ısıtma veya soğutma işlemleri ile Fe istenilen faz bölgesinde tutularak, özelliklerinin belirli sınırlar içinde kalması sağlanmaktadır [4-9].

\* Sorumlu yazar: [caksu@firat.edu.tr](mailto:caksu@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-8896-8571, <sup>2</sup> 0000-0002-5151-4576

Fe'in manyetik özelliklerinden dolayı oldukça karmaşık bir faz diyagramı vardır. Manyetik özellikleri iletim elektronlarını ve dolayısıyla bağlanma özelliklerini etkilemektedir [10, 11]. Bununla birlikte benzetim yöntemleri Fe deki faz dönüşümlerinin belirlenmesinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [12-14]. Son yıllarda Fe deki faz geçişlerini belirlemek için birçok yeni potansiyel fonksiyonu geliştirilmiştir. Bunlardan birisi bağ yönelimlerini içeren Müller ve arkadaşları tarafından önerilen potansiyeldir. Bu potansiyel sadece  $\alpha$ - $\gamma$  dönüşümünü değil aynı zamanda  $\gamma$ - $\delta$  dönüşümünü de modellemede kullanılmaktadır [15]. Tateyama ve arkadaşları elektron yoğunluğu aralığını değiştirmiş ve Finnis-Sinclair potansiyelini modifiye ederek Fe deki katı-katı faz dönüşümlerini çalışmıştır [16]. Lee ve arkadaşları modifiye gömülmüş atom metodu geliştirerek meydana gelen katı-katı faz dönüşümlerini gözlemleniler [17]. Ayrıca Finnis-Sinclair [18] ve Johnson-Oh [19] potansiyelleri 0 ile 1800 K sıcaklık aralığında fcc fazından daha düşük enerjili bir bcc fazı üretmektedir.

Bilgisayar benzetimleri son 40 yılda maddelerin atomik seviyede yapı ve özelliklerinin anlaşılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle atomlar arası etkileşmeleri ifade eden potansiyel enerji fonksiyonunun incelenen sistem için uygun olarak tanımlanması malzemelerin yapı ve özelliklerinin gerçeğe en yakın olarak belirlenmesinde en önemli faktördür [20-22]. Literatürde farklı sistemlerin modellenmesinde kullanılan birçok potansiyel enerji fonksiyonu mevcuttur [23-26]. En çok kullanılan potansiyel enerji fonksiyonlarından birisi çok cisim etkileşmelerini içeren ve basit bir matematiksel ifadeye sahip olan GAMdır [27]. Bu potansiyel fonksiyonunun Vother-Chen [28], Finnis-Sinclair [29] and Sutton-Chen (SC) [30] tarafından geliştirilen farklı türleri bulunmaktadır. Bununla birlikte atomik etkileşmeleri tanımlamaya yönelik mevcut en iyi yaklaşım kuantum mekaniksel etkileşmeleri içeren ilk prensip (first principles) metotlarıdır. Fakat bu metodun kullanılmasında düşük parçacık sayısına ve yüksek işlem gücüne sahip bilgisayarlara ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak atom sayısının fazla olduğu ve uzun bir zaman ölçeği gerektiren benzetim çalışmalarının çoğu, deneysel ve yarı deneysel olarak tanımlanan atomlar-arası etkileşmeleri içerir [21, 22].

Bu çalışmada 4000 atomdan meydana gelen Fe tek atomlu model sisteminde oda sıcaklığından erime noktasına kadarki sıcaklık aralığında oluşan  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$  fazları moleküler dinamik benzetimi ile incelendi. Çalışmalarda LAMMPS açık kaynak kodlu moleküler dinamik benzetim programı kullanıldı. Model sistemin yapısal analizlerinde radyal dağılım fonksiyonu, termodinamik niceliklerde değişimler ve Ackland-Jones analiz yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen dönüşüm sıcaklıkları deneysel değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçların deneysel değerlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.

## 2. Materyal ve Metot

MD benzetim yöntemi analitik olarak çözümü zor veya imkansız olan problemlerin sayısal çözümünü amaçlar. Atomlar arası etkileşmelerin bir potansiyel enerji fonksiyonu ile temsil edildiği  $N$  atomdan meydana gelen bir sistemin Lagrange fonksiyonu

$$L_{PR}(\mathbf{r}^N, \dot{\mathbf{r}}^N, \mathbf{h}, \dot{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N m_i (\dot{\mathbf{s}}_i^t \mathbf{G} \dot{\mathbf{s}}_i) - \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \phi(|\mathbf{h} \mathbf{s}_{ij}|) + \frac{1}{2} M \text{Tr}(\dot{\mathbf{h}}^t \dot{\mathbf{h}}) - P_{ext} V \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $i$  parçacığının kütlesi  $m_i$ ,  $i$  atomunun koordinatı  $s_i$ , MD hücre eksenleri  $\mathbf{h}$ ,  $\mathbf{h}^t \mathbf{h}$  değerine sahip metrik tensörü  $\mathbf{G}$ , MD hücresinin kütlesini temsil eden keyfi bir sabit  $M$ , dış basınç değeri  $P_{ext}$  ve hesaplama hücresinin hacmi  $V$  ile ifade edilmektedir. Sistem için hareket denklemleri (1) ifadesi kullanılarak parçacıklar ve MD hücresi için aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

$$\ddot{\mathbf{s}}_i = -\frac{1}{m_i} \mathbf{F}_i - \mathbf{G}^{-1} \dot{\mathbf{G}} \dot{\mathbf{s}}_i \quad (2)$$

$$\ddot{\mathbf{h}} = M^{-1} (\mathbf{\Pi} - \mathbf{I} P_{ext}) \sigma \quad (3)$$

burada  $\sigma = V(\mathbf{h}^t)^{-1}$  olarak verilmekte ve mikroskobik zor tensörü  $\mathbf{\Pi}$  aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [31-32].

$$\mathbf{\Pi} = V^{-1} \left[ \sum_{i=1}^N m_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i - \sum_{i=1}^N \sum_{j>i}^N \frac{F_{ij}}{r_{ij}} \mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}_i \right] \quad (4)$$

Hesaplamalarda büyük ölçekli atomic/moleküler kitlesel paralel simülatör (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator-LAMMPS) açık kaynak kodu moleküler dinamik benzetimini kullanıldı [33]. MD

hücre, 4000 Fe atomunun başlangıç konumları olarak seçilen fcc örgü noktalarına yerleştirilmesiyle oluşturuldu. Parçacık sayısının, basıncın ve sıcaklığın sabit tutulduğu *NPT* istatistiksel topluluğu kullanıldı. MD hücreindeki Fe atomlarının başlangıç hızları Maxwell-Boltzman hız dağılımına uyularak rasgele belirlendi. Parçacık hızları her iki adımda bir yeniden hesaplanarak sistemin sıcaklığı kontrol altında tutuldu. Bütün hesaplama süresince periyodik sınır şartları *x*, *y* ve *z* eksenleri doğrultusunda uygulandı. Hareket denklemlerini sayısal olarak integre edebilmek için Verlet'in hız algoritması kullanıldı. Potansiyel etkileşmesinin kesilim mesafesi olan cut-off değeri  $2a_{Fe}$  olarak seçildi. MD zaman adımı hesaplamalarda 1 fs olarak alındı.

## 2.1 Potansiyel enerji fonksiyonu

Potansiyel enerji fonksiyonları malzemelerin geniş bir aralıkta özelliklerini belirlemede kullanılmaktadır. *N* atomdan meydana gelmiş atomik sistemlerin toplam enerjisi GAM [28-30];

$$E_T = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^{N} \phi(r_{ij}) + \sum_i^N F(\bar{\rho}_i) \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem sırasıyla itici etkileşmeleri içeren ikili etkileşme fonksiyonu ve çekici etkileşmeleri içeren gömme enerjisi fonksiyonundan oluşmaktadır. Literatür incelendiğinde itici ve çekici etkileşmeleri ifade eden fonksiyonların farklı şekilde tanımlanması GAM'ın farklı türlerini oluşturmaktadır [28, 29]. Literatürde Fe elementinin modellenmesi için kullanılan birçok potansiyel fonksiyonu bulunmaktadır [20-22]. Bununla birlikte hiçbir potansiyel kristal ve sıvı yapıdaki Fe in geniş bir aralıkta özelliklerini tam olarak açıklamaya yeterli değildir. Bu çalışmada Ackland ve arkadaşları tarafından Fe elementi için geliştirilen GAM potansiyeli ve deneysel verilerle yeniden fit edilmesinden elde edilen parametreleri kullanıldı [22].

Maddelerin fazlarını atomların birbirleriyle etkileşmesi ve dizilimleri belirler. Model sistemde aynı ve farklı tür atomlar arasındaki ilişkinin incelenmesinde radyal dağılım fonksiyonu (RDF) en çok kullanılan analiz tekniklerinden biridir. Bu teknikte seçilen bir *i* atomundan herhangi bir *r* mesafesinde  $\Delta r$  küre kabuğu içerisine giren atomların sayısı *n*(*r*) olmak üzere *g*(*r*) radyal dağılım fonksiyonu;

$$g(r) = \left\langle \frac{V}{N^2} \frac{\sum_i n_i(r)}{4\pi r^2 \Delta r} \right\rangle \quad (6)$$

ifadesi ile verilir [34].

Benzetim çalışmalarında önemli problemlerden birisi de yapı içerisinde belirlenmesi zor olan fcc, hcp, bcc gibi sıkı paket yapıların tespit edilmesidir. Bu çalışmada MD hücreleri içerisinde var olan bu birim hücreli yapıların yüzdeleri Ackland-Jones analiz yöntemi kullanılarak belirlenmeye çalışıldı [35].

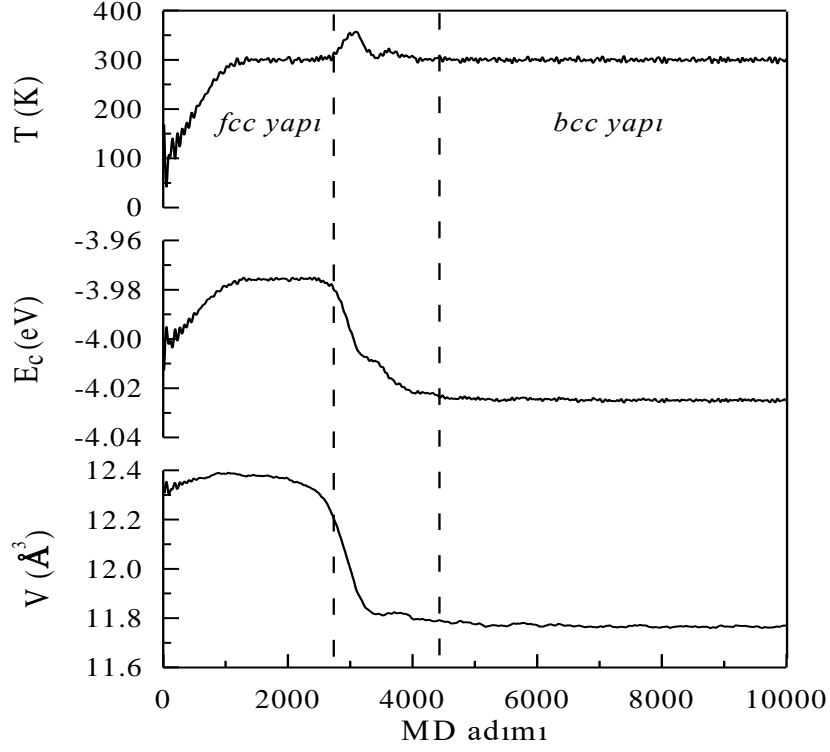
## 3. Bulgular

Fe, katı faz bölgesinde farklı sıcaklık aralıklarında farklı kristal örgü yapısına sahip bir elementtir. Bu çalışmada Fe elementindeki faz geçişleri ve bu geçişlerin meydana geldiği sıcaklık aralıkları belirlenmeye çalışılmıştır. Benzetim çalışmasına başlamadan önce 4000 Fe atomu başlangıç konumları olarak seçilen fcc örgü noktalarına yerleştirildi. Başlangıç sıcaklığı olarak 300 K seçilmiştir. Benzetim çalışmasının ilk 10000 adımı için sıcaklık, birim atom başına enerji ve hacim değişimleri Şekil 1'de görülmektedir. Hesaplama sürecinin başlangıcından itibaren ilk 1000 MD adımında niceliklerde bir yükselme meydana gelmekte ve bu adımın sonunda sistem fcc yapıda dengeye ulaşmaktadır. Model sistem fcc fazdaki bu kararlı denge yapısını yaklaşık 2800. MD adımına kadar korumaktadır. Bu adımdan sonra niceliklerde bir değişimin meydana geldiği Şekil 1'de açıkça görülmektedir. Sıcaklık değerinde ani bir artışa karşılık enerji ve hacim değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir. Bu durumda MD hücrelerinde fcc birim hücreli yüksek enerjili fazdan bcc birim hücreli düşük enerjili faza yapısal bir faz dönüşümünün meydana geldiği söylenebilir. 4400. MD adımında ise niceliklerin tekrardan denge durumuna geldiği belirlenmiştir. Deneysel olarak 300 K sıcaklıkta Fe in bcc birim hücreli  $\alpha$  fazında olduğu bilinmektedir [1]. Başlangıçta Fe atomlarının fcc örgü noktalarına yerleştirildiği MD hücrelerinin kısa bir süre sonra aynı sıcaklık değerinde bcc birim hücreli faza dönüşüm sergilemesi, kullanılan potansiyel enerji fonksiyonunun Fe sistemini gerçekçi bir şekilde modelleyebileceğini göstermektedir.

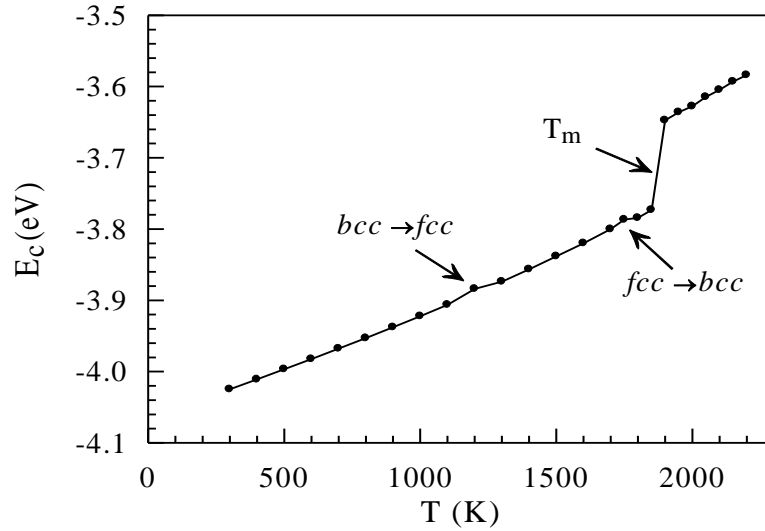
Katı-katı faz geçişlerini ve erime sıcaklığını belirlemek amacı ile 4000 atomdan meydana gelen model sistem 300 K sıcaklığında 100000 MD adımı dengeye getirilerek bcc birim hücreli yapıya sahip  $\alpha$ -Fe elde edildi. Daha sonra sistemin sıcaklığı 300 K den 2200 K'e 100 K sıcaklık aralıklarıyla artırıldı. Her sıcaklık değerinde



50000 MD adımı sistem dengeletildi. Çalışma sonunca her sıcaklık değeri için birim atom başına bağlanma enerjisi olan  $E_c$  nin son 5000 MD adımı üzerinden ortalaması alındı. Elde edilen sonuçlar Şekil 2’de gösterildiği gibi verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde 1100 K sıcaklık değerine kadar enerji değerinin doğrusal bir artış içinde olduğu görülmektedir. 1200 K sıcaklık değerinde enerjide küçüğe olsa bir artış olduğu belirlenmiştir. Enerjideki bu artış yapısal bir faz dönüşümüne işaret etmektedir. Daha sonra yapılan diğer analizlerde de bu sıcaklık değerinde Fe model sisteminin bcc birim hücreli bir fazdan fcc birim hücreli bir faza dönüşüm yaptığı görülmektedir.



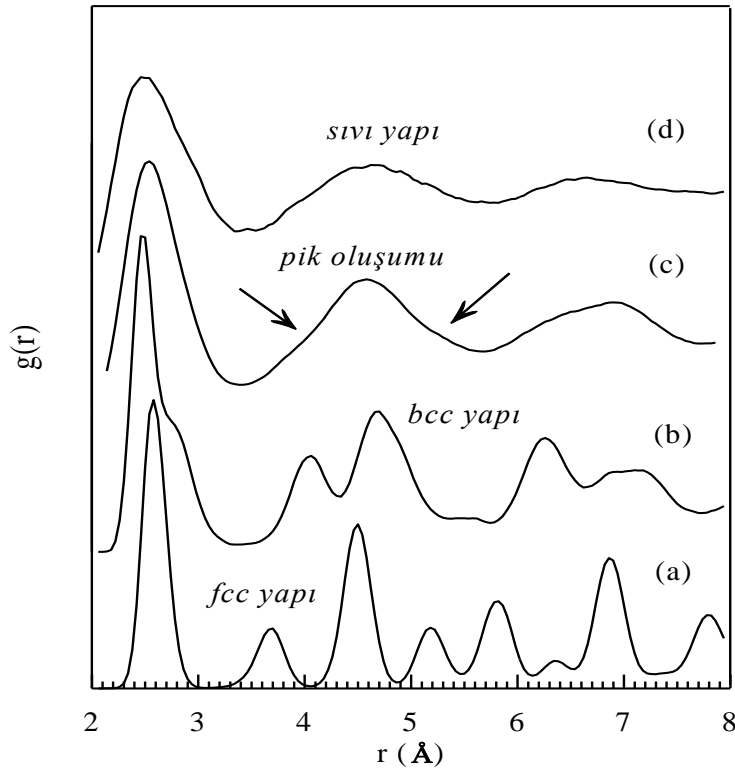
Şekil 1. 300 K sıcaklık değerinde ilk 10000 adım için sıcaklık, enerji ve hacimdeki değişim.



Şekil 2. 0 basınç değerinde sıcaklıkla birim atom başına bağlanma enerjisinin değişimi.

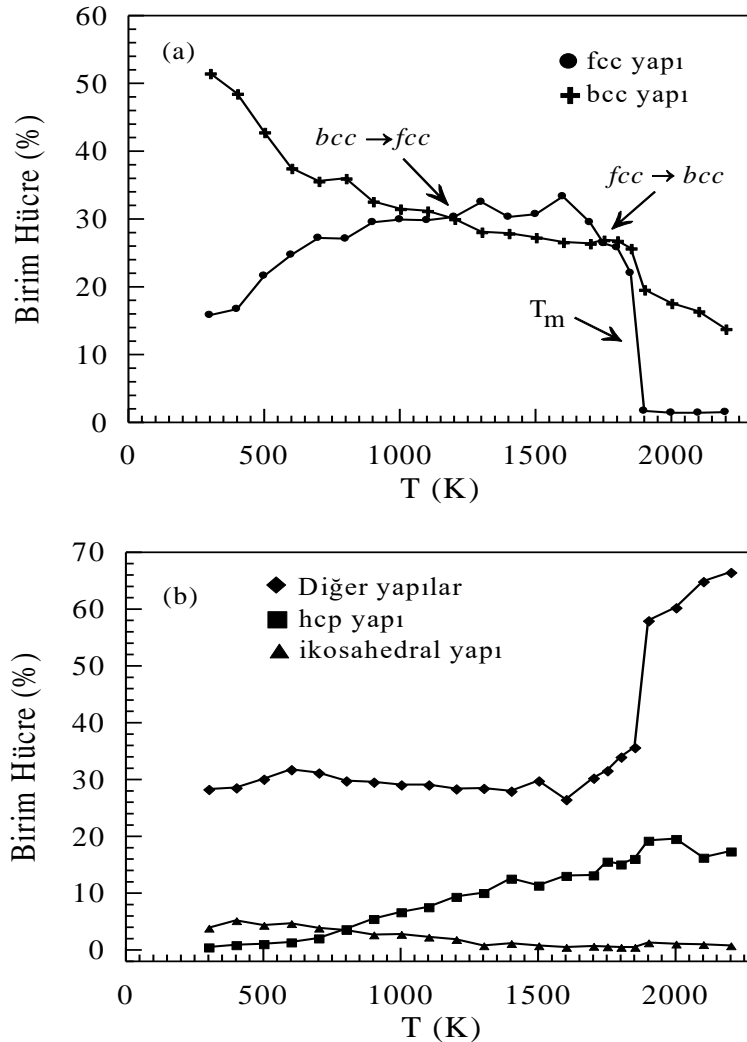
Deneysel olarak Fe elementi 1184 - 1680 K sıcaklık aralığında fcc faza sahip olan  $\gamma$ -Fe olarak bilinmektedir [2]. Yaptığımız çalışmada fcc faza geçiş sıcaklığının deneysel değerlerle uyum içinde olduğu ve belirlenen değer deneysel değerden yaklaşık %1,3 değerinde saptığı görülmüştür. fcc faza sahip  $\gamma$ -Fe kararlı yapısını yaklaşık 1750 K sıcaklık değerine kadar korumaktadır. 1750 K sıcaklık değerine ulaşıldığında enerjide yeniden bir artış belirlenmiştir. Bu sıcaklık değerinde yapı bir kez daha katı-katı faz dönüşümüne uğrayarak fcc birim hücreli  $\gamma$ -Fe den bcc birim hücreli  $\delta$ -Fe'e bir dönüşüm meydana gelmiştir. bcc birim hücreli  $\delta$ -Fe kararlı yapısını 1850 K sıcaklığına kadar korumaktadır. Deneysel olarak  $\delta$ -Fe 1680 - 1809 K sıcaklık aralığında oluşmaktadır [2]. Elde edilen MD sonuçların deneysel dönüşüm sıcaklıklarıyla uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Sıcaklık 1850 K'ne ulaşıldığında enerjide bir süreksizlik meydana gelmektedir. Kohesif enerjide meydana gelen bu süreksizlik yapının katı fazdan sıvı faza geçişinin bir göstergesidir [36]. Model Fe sistemi için erime sıcaklığı  $1875 \pm 25$  K olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak Fe elementini erime sıcaklığı 1809 K'dir [6]. Belirlenen erime sıcaklığı yaklaşık %3,6 lık bir sapma miktarı ile deneysel değerlerle uyum içerisindedir.

Şekil 3'de gösterildiği gibi farklı sıcaklıklarda elde edilen RDF eğrileri verilmiştir. 300 K sıcaklığında 2000. MD adımında elde edilen RDF eğrisi Şekil 3(a)'da gösterildiği gibidir. Buradan model sistemin benzetim çalışmasının başlangıcında fcc yapıya sahip olduğu söylenebilir. Model sistemin bu sıcaklık değerinde yarı kararlı bir faza sahip olduğu ve bcc birim hücreli kararlı  $\alpha$ -Fe fazına dönüştüğü 8000. MD adımında elde edilen RDF eğrisinden Şekil 3(b)'de gösterildiği gibi açıkça görülmektedir. RDF eğrisindeki ikinci pik örgü parametresine karşılık gelmektedir ve 2,84 Å olarak belirlenmiştir. Literatürde  $\alpha$ -Fe'in 300 K sıcaklığındaki örgü parametresi 2,856 Å verilmektedir [6]. MD hesaplamalarından elde edilen örgü parametresinin deneysel değerlerle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Şekil 3(c)'de 1600 K sıcaklık değerinde elde edilen RDF eğrisi verilmiştir. 1200 K - 1750 K sıcaklık aralığında Fe model sistemi fcc birim hücreli  $\gamma$ -fazında bulunmaktadır. RDF eğrisi incelendiğinde oklarla gösterilen noktalarda pik oluşumları görülmektedir. Oluşan piklerin baskın bir şekilde görülmemesine rağmen bu piklerin varlığı yapının fcc birim hücreli bir faza sahip olduğunun bir göstergesidir. 1750 K - 1850 K sıcaklık aralığında model sistem bcc birim hücreli  $\delta$ -Fe fazına dönüşmesine rağmen bu dönüşüm RDF eğrilerinde açıkça görülmediği için bu faz ile ilgili RDF eğrisi verilmemiştir. Şekil 3(d)'de gösterildiği gibi 2000 K'de elde edilen RDF eğrisi çizilmiştir. Bu eğriden model sistemin sıvı fazda olduğu görülmektedir.



Şekil 3. (a) 300 K, (b) 300 K, (c) 1600 K ve (d) 2000 K sıcaklık değerlerinde elde edilen RDF eğrileri.

Şekil 4'te gösterildiği gibi Ackland-Jones analiz yönteminden elde edilen ve sıcaklık değişimine bağlı olarak 4000 atomlu Fe sisteminde oluşan farklı birim hücreli yapıların yüzde değerleri verilmiştir. Analiz yönteminden bcc, fcc, hcp, ikosahedral ve bu yapıların haricindeki diğer yapıların yüzdeleri belirlenmiştir. Şekil 4 (a)'da gösterildiği gibi sıcaklık değişimine karşılık yapı içerisindeki bcc ve fcc birim hücrelerin yüzde miktarları verilmiştir. 300 K'den başlayarak sıcaklık artırıldığında bcc yapıların azaldığı buna karşılık fcc birim hücreli yapıların arttığı açıkça görülmektedir. Yapı içerisinde fcc ve bcc yapıların birbirine eşit olduğu 1200 K sıcaklık değerinden sonra fcc miktarının arttığı bcc miktarının azaldığı belirlenmiştir. Bu sıcaklık değerinde model sistemde bcc  $\rightarrow$  fcc katı-katı faz dönüşümünün meydana geldiği söylenebilir. 1750 K sıcaklık değerine kadar fcc birim hücrelerin sayısının fazlalığı yapının daha düşük enerjili bu fazda kararlı kaldığını göstermektedir. Model sistem içerisinde fcc ve bcc fazlarının yüzdelerinin eşit olduğu bir diğer nokta 1750 K sıcaklık değeridir. Bu sıcaklık değerinden sonra sistem erime noktasına ulaşana kadar kısa sürelide olsa bcc birim hücreli yapıların baskın olduğu  $\delta$ -Fe' e dönüşmektedir. 1875 K sıcaklık değerinde model sistemin sıvı faza dönüştüğü fcc ve bcc yüzde miktarlarındaki ani düşüşlerden açıkça görülmektedir. Bu sıcaklık değerinden sonra yapı içerisinde fcc yüzde miktarı oldukça azalmıştır. Buna karşılık bcc yüzde miktarında da bir azalma meydana gelmekle birlikte yine bir miktar bcc birim hücreli yapının bulunduğu görülmektedir. Sıcaklık değerinin artmasıyla birlikte bcc birim hücreli yapılar da giderek azalmaktadır. Sıcaklık değerinin yükseltilmesinin veya uzun süre yüksek sıcaklıkta bekletmenin bu yapıların sayısını daha da düşüreceği söylenebilir.



Şekil 4. Sıcaklık artışıyla Fe model sisteminde bulunan (a) fcc, bcc, (b) hcp, ikosahedral ve diğer birim hücre yapıların yüzdelerinin sıcaklıkla değişimi.

Şekil 4(b)'de gösterildiği gibi hcp, ikosahedral ve diğer yapılara ait yüzde değişimleri verilmiştir. Şekil 4(b)'de gösterilen model sistemde meydana gelen dönüşüm sıcaklıklarında bu yapılarda da küçük de olsa meydana gelen değişimler görülmektedir. Sıcaklığın artırılmasıyla birlikte diğer yapılar adı altındaki tamamen düzensiz dizilimdeki atomlardan oluşan sistemlerin sayısının giderek arttığı açıkça görülmektedir.

#### 4. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada 4000 atomdan meydana gelen Fe model sistemi Gömülmüş Atom Metodu potansiyel fonksiyonu kullanılarak modellendi. Model sisteme uygulanan ısıtma işlemi esnasında farklı sıcaklıklarda meydana gelen katı-katı faz dönüşümleri gözlemlenmeye çalışıldı. Isıtma işlemi boyunca Fe elementinde  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \delta$  faz geçişlerinin meydana geldiği gözlemlendi ve benzetim çalışmalarından belirlenen dönüşüm sıcaklıkların deneysel değerlerle uyum içerisinde olduğu tespit edildi. Ayrıca etkileşmelerin belirlenmesi için kullanılan potansiyel enerji fonksiyonunun da Fe model sistemindeki katı-katı faz geçişlerini modellemede oldukça başarılı olduğu ve birçok çalışmada model sistemin yapısal ve termodinamik özelliklerinin incelenmesinde kullanılabileceği söylenebilir.

#### Kaynaklar

- [1] Engin C., Urbassek H.M., Molecular-dynamics investigation of the fcc-bcc phase transformation in Fe. *Computational Materials Science* 2008, 41: 297–304.
- [2] Weissavach W., Malzeme Bilgisi ve Mayenesi, Birsen Yayın evi. 5. Baskı, İstanbul, 2009.
- [3] Karewar S., Sietsma J., Santofimia M.J., Effect of pre-existing defects in the parent fcc phase on atomistic mechanisms during the martensitic transformation in pure Fe: A molecular dynamics study. *Acta Materialia* 2018, Vol.142: 71-81.
- [4] Singh S.B., Mechanisms of bainite transformation in steels. *Phase Transformations in Steels* 2012; Vol 1: 385-416.
- [5] Porter D.A., Easterling K.E., *Phase Transformations in Metals and Alloys*, 2nd ed., Chapman & Hall, London, 1992.
- [6] Pepperhoff W., Acet M., *Constitution and Magnetism of Iron and its Alloys*, Springer, Berlin, 2001.
- [7] Pereloma E., Edmonds D. V., *Phase transformations in steels: Vol. 2 Diffusionless transformations, high strength steels, modelling and advanced analytical techniques*. Oxford: Woodhead, 2012.
- [8] Gandhi K.R.K., Singru R.M., Effect of bcc-fcc phase transition on the compton profiles of iron. *Appl. Phys. A* 1982, 28: 119–122.
- [9] Cuenya B.R., et al., Observation of the fcc-to-bcc Bain transformation in epitaxial Fe ultrathin films on Cu<sub>3</sub>Au(001), *Surface Science*, 2001, vol. 493(1–3): pages 338-360.
- [10] Haasen P., *Physikalische Metallkunde*, 3rd ed., Springer Berlin, 1994.
- [11] Entel P., Meyer R., Kadau K., Herper H.C., Hoffmann E., Martensitic transformations: first-principles calculations combined with molecular-dynamics simulations. *Eur. Phys. J. B* 1998, vol.5: 379-388.
- [12] Porter D.A., Easterling K.E., *Phase transformations in metals and alloys* (2nd ed.), Chapman & Hall, London, 1992.
- [13] Pepperhoff W., Acet M., *Constitution and magnetism of iron and its alloys*, Springer, Berlin, 2001.
- [14] Pereloma E., Edmonds D.V. (Eds.), *Phase transformations in steels, Diffusionless transformations, high strength steels, modelling and advanced analytical techniques*, vol. 2, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2012.
- [15] Lee B., Shim J., Baskes M.I., Semiempirical atomic potentials for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, Al, and Pb based on first and second nearest-neighbor modified embedded atom method. *Phys. Rev. B*, 2003, 68B: 144112.
- [16] Tateyama S., Shibuta Y., Kumagai T., Suzuki T., A Molecular Dynamics Study of Bidirectional Phase Transformation between bcc and fcc Iron. *ISIJ Int.* 2011, vol.51(10): 1710-1716.
- [17] Lee T., et al, Atomistic modeling of thermodynamic equilibrium and polymorphism of iron. *J. Phys.: Condens. Matter* 2012, vol.24: 225404.
- [18] Finnis M.W., Sinclair J.E., A simple empirical N-body potential for transition metals. *Philosophical Magazine A* 1984, vol.50(1): 45-55.
- [19] Johnson R., Oh D., Analytic embedded atom method model for bcc metals. *Journal of Materials Research* 1989, vol.4(5), 1195-1201.
- [20] Etesami S.A., Asadi E., Molecular dynamics for near melting temperatures simulations of metals using modified embedded-atom method. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2018, vol.112: 61–72.
- [21] Chamati H., et al., Embedded-atom potential for Fe and its application to self-diffusion on Fe(100). *Surface Science* 2006, vol.600: 1793–1803.
- [22] Mendeleev M. I., et al., Development of new interatomic potentials appropriate for crystalline and liquid iron. *Philosophical Magazine* 2003, vol. 83, No. 35: 3977–3994.
- [23] Cagin T., Dereli G., Uludogan M., Tomak, M., Thermal and mechanical properties of some fcc transition metals. *Phys. Rev. B* 1999, vol.59(4): 3468-3472.
- [24] Zhang X.J., Chen C.L., Phonon dispersion in the Fcc metals Ca, Sr and Yb. *J. Low Temp. Phys.* 2012, vol.169: 40-50.
- [25] Tolpin K.A., Bachurin V.I., Yurasova, V.E., Features of energy dependence of NiPd sputtering for various ion irradiation angles. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 2012, vol.273: 76-79.

- [26] Louail L., Maouche D., Roumili A., Hachemi, A., Pressure effect on elastic constants of some transition metals. *Mat. Chem. Phys.* 2005, vol.91: 17-20.
- [27] Daw, M.S., Hatcher, R.D., Application of the embedded atom method to phonons in transition metals. *Solid State Comm.* 1985, vol.56: 697-699.
- [28] Voter A.F., Chen S.P.. Accurate Interatomic Potentials for Ni, Al, and Ni<sub>3</sub>Al. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 1987, vol.82: 175.
- [29] Finnis M.W., and Sinclair, J.E. 1984. A simple empirical N-body potential for transition metals. *Philosophical Magazine*, 1984; 50: 45-55.
- [30] Sutton, A.P., Chen, J.. Long-range Finnis-Sinclair potentials. *J. Philosophical Magazine Letter*, 1990; 61: 139-146.
- [31] Parrinello, M., and Rahman, A.. Crystal Structure and Pair Potentials: A Molecular-Dynamics Study. *Phys. Rev. Lett.*, 1980; 45: 1196-1201.
- [32] Parrinello M., and Rahman, A.. Polymorphic transitions in single crystals: A new molecular dynamics method. *J. Appl. Phys.*, 1981; 52: 7182-7190.
- [33] <http://lammmps.sandia.gov/>. LAMMPS Molecular Dynamics Simulator (Access Date:10.09.2020)
- [34] Rigby, M., Smith, E. B., Wakeham, W. A., Maitland, G. C., *The Forces Between Molecules*, 144, Oxford University Press, Clarendon Press, 1986.
- [35] Ackland G. J., and Jones A. P., Applications of local crystal structure measures in experiment and simulation. *Physical Review B*, 2006, vol.73: 054104.
- [36] Karimi M., Stapay G., Kaplan T., Mostoller M., Temperature dependence of the elastic constants of Ni: reliability of EAM in predicting thermal properties. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 1997, vol.5: 337.

## Doğal Renkli Pamuk: Genel Özellikleri ve Tekstil Alanında Yapılan Önceki Çalışmalar

Muhammed Fatih YÜKSEL<sup>1\*</sup>, Gürkan ŞENEL<sup>1</sup>, Rıza ATAV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eren Perakende Satış ve Mağazacılık A.Ş., Ar-Ge Merkezi, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup> Tekstil Mühendisliği Bölümü, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye

\*1 fatih.yuksel@erenperakende.com <sup>1</sup> gurkan.senel@erenperakende.com <sup>2</sup> ratav@nku.edu.tr

(Geliş/Received: 12/10/2020;

Kabul/Accepted: 23/11/2020)

**Öz:** Tekstil endüstrisinin vazgeçilmez hammaddelerinden biri olan pamuk, beyaz rengin ötesinde çeşitli kahve ve yeşil tonlarında da üretilebilen doğal bir elyaftır. Doğal renkli pamuk, sahip olduğu çeşitli özelliklerle tekstil endüstrisi için yenilikçi katma değeri yüksek ürünler geliştirilmesinde önemli bir fırsat sunmaktadır. Çevredostu üretimin büyük önem kazandığı günümüz koşullarında atık yükü oluşturmeyen yeni proseslerin ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi büyük önem kazanmıştır. Terbiye prosesleri arasında en fazla atık yükü oluşturan boyama işlemlerini ortadan kaldırmanın ve böylece önemli çevresel avantajlar elde etmenin bir yolu doğal lifin renkli olarak yetiştirilmesidir. Renkli pamuk üretimi her ne kadar uzun yıllar önce başarılmış bir konu olsa da literatür incelendiğinde renkli pamukların fiziksel-teknolojik özellikler açısından beyaz pamuğa göre geride kalıyor olmasının bu liflerin yaygın kullanımı üzerinde önemli bir engel teşkil ettiği anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, renkli pamuğun yetiştiriciliği ve türleri hakkında özet bilgi verildikten sonra; liflerin genel özellikleri, avantaj ve dezavantajları ile renkli pamuk konusunda bugüne kadar yapılmış tekstil alanındaki önceki çalışmalara ilişkin literatür özeti sunulmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Doğal renkli pamuk, boyama, çevredostu

### Natural Colored Cotton: General Properties and Previous Studies in Textile Field

**Abstract:** Cotton, one of the indispensable raw materials of the textile industry, is a natural fiber that can be produced in various shades of brown and green beyond the white color. Naturally colored cotton offers an important opportunity to develop innovative products with high added value for the textile industry with its various properties. In today's conditions, where environmentally friendly production is of great importance, the development of new processes and production methods that do not create waste has gained great importance. One way to eliminate dyeing process that creates the largest waste load among finishing processes and thus gain significant environmental advantages is to grow colored natural fiber. Although the production of colored cotton is a subject that has been accomplished many years ago, when the literature is examined, it is understood that the fact that colored cotton is behind white cotton in terms of physical-technological properties poses a significant obstacle to the widespread use of these fibers. In this study, after giving brief information about the cultivation and types of colored cotton; a literature survey on the general fiber characteristics, advantages and disadvantages of colored cotton and previous studies in textile field on colored cotton is presented.

**Key words:** Naturally colored cotton, dyeing, environmentally friendly

#### 1. Giriş

Tekstil endüstrisinde hammadde olarak birçok farklı türde lif kullanılmaktadır. Bu liflerin bazıları, medeniyetin ilk yıllarından günümüz modern zamanlarına kadar uzanan bir sürede kullanılmaya başlanmıştır. Temel olarak yeni bir elyaf türünün piyasaya sürülmesinin maliyetli olacağı kanısı nedeniyle ancak elyafın performans veya başka bir açıdan diğer liflerden ayrılan özelliği varsa o elyaf pazara tanıtılabilmektedir. Liflerin gelişimini etkileyen faktörlerden bazıları eğrilebilme kabiliyetleri, yeterli miktarda bulunabilirlikleri, üretim maliyeti ve sahip olduğu özelliklerinin tüketiciler tarafından istenirliği olarak sayılabilir [1].

Pamuk (*Gossypium hirsutum L.*) elyafı, tekstil endüstrisi için en önemli hammaddelerden biridir ve dünyanın tekstil ticaretinin bel kemiğidir [2]. Dünyada az sayıda ülke ekolojisinin pamuk tarımına elverişli olması nedeniyle, dünya üretimi Türkiye'nin de içinde bulunduğu az sayıda ülke tarafından gerçekleştirilmektedir. Uluslararası Pamuk İstişare Komitesi (ICAC)'nin 2014-2018 arası 5 yıllık döneme ilişkin verileri incelendiğinde dünyada ortalama 32,1 milyon hektar alanda pamuk ekimi yapıldığı ve bu ekimden ortalama 24,6 milyon ton pamuk lifi elde edildiği görülmektedir. Dünya pamuk lifi veriminin en yüksek olduğu ülke Avustralya'dır. 2018/19 sezonunda ICAC verilerine göre Türkiye ise 1944 kg/ha'lık üretimle pamuk veriminde ikinci sıraya yükselmiştir.

\* Sorumlu yazar: [fatih.yuksel@erenperakende.com](mailto:fatih.yuksel@erenperakende.com) Yazarların ORCID Numarası: <sup>1\*</sup> 0000-0003-4239-3212, <sup>1</sup> 0000-0003-4320-1729 <sup>2</sup> 0000-0002-5807-4542

Dünyada en çok pamuk tüketen ülkeler yine en çok üretim yapan ülkelerdir. Dünya pamuk tüketiminden en büyük payı 8,4 milyon ton ile Çin almaktadır [3].

Tekstil endüstrisinin en yaygın hammaddesi pamuk, alışılmış beyaz renginin dışında da renklere sahip olabilmektedir [4]. Doğal renkli pamuk doğada bulunan renkli pamuk tohumlarından ve ayrıca bunların genetik olarak değiştirilmesiyle üretilen tohumlardan elde edilmektedir. Doğal halde beyaz, yeşil, kahverengi ve bu renklerin tonlarında bulunmakla beraber diğer renklerin elde edilebilmesi için yapılan çalışmalar dünya genelinde ve ülkemizde devam etmektedir [5]. Renkli liflere sahip pamuk bitkileri çok uzun bir süredir yetiştirilmektedir [2], ancak iki nedenden dolayı gelişmeleri beyaz elyaf pamuğundan daha yavaş olmuştur. İlk olarak, renkli elyaf pamuğun verimi beyaz elyaf pamuğunkinden çok daha düşüktür [6]. İkincisi ise, tekstil endüstrisinde kullanılan ucuz boyarmadde türleri mevcuttur ve bu tür uygulamaların olumsuz sonuçları uzun süredir göz ardı edilmiştir [7]. Bunun sonucunda tekstil endüstrisi her rengi elde edebilmek için beyaz pamuğu tercih etmiştir [8]. Ticari olarak pazarlarda ulaşılabilen renkli pamuk Amerika'nın yerli nüfusu tarafından yüzyıllardır üretilmekte ve tarımı yapılmaktadır [9]. Dünyadaki en çok renkli pamuk üreten diğer ülkeler ise Çin, Hindistan, Pakistan ve Özbekistan'dır [10].

Son zamanlarda çevreye ve insana dostça yaklaşan üretim stratejileri ve endüstriyel işlemlerin gündeme gelmesi nedeniyle, doğal renk pigmentlerini içeren ve de organik olarak yetiştirilecek "renkli pamuk üretimi" konusuna dikkatler çevrilmiştir [9]. Doğal renkte pamuklar, beyaz dışındaki doğal renklere sahip lifleri ifade etmektedir [11]. Organik ve doğal renkli pamuk liflerinin, kumaş ve giysi üretimi ile ilgili bazı firmalar ve üreticiler tarafından el sanatları, örgü, gömlek, süveter, çorap, havlu, iç çamaşırı ve diğer giyim eşyaları, ev dekorasyonları ve mefruşat alanlarında kullanılabilirlikleri gösterilmiştir ve böylelikle de bu ürünlerin ABD, Avrupa ve Japon pazarlarına tanıtımları başlamıştır [9].

Doğal renkli pamuk, gelecekte farklı ürünler geliştirilmesi için araştırılabilecek kirlilik içermeyen, çevre dostu, enerji tasarruflu, uygun maliyetli, toksik olmayan, yeni uygulanabilir bir tekstil hammaddesidir. Dünya kirlilik içermeyen organik tekstil ve ürünlere doğru yönelirken, doğal renkli pamuk pazardaki anahtar kelime haline gelecektir. Bunun nedeni ise; doğal renkli pamuk üretim sürecinin, tekstil ürünleri imalatının en kirlitici faaliyetini (boyama) ortadan kaldırmasıdır [12]. Küresel tekstil faaliyetlerinin olumsuz çevresel etkileri olan kimyasal atık akışı göz önünde bulundurulursa doğal renkli pamuğun bu faydası sayesinde büyük bir başarıya sahip olacağı düşünülmektedir [11]. Ev tekstili, gündelik giyim, döşemelik kumaşlar ve sentetik boyalı tekstil malzemelerinin olası her ikamesinde geliştirilip uygulanabilirler. Renkli pamuk hem benzersiz hem de arzu edilen özelliklere sahip olan tüketiciye ve çevreye fayda sağlayan bir tekstil hammaddesidir [12]. Doğal renkli pamuklardan üretilen kumaşlar ve giysiler çevreye daha küçük ayak izleri bırakır ve bu nedenle doğal renkli pamuklara genellikle "çevre dostu pamuk" denir [11].

## 2. Doğal Renkli Pamuk Yetiştiriciliği

Renkli pamuğun dikim ve yetiştirme yöntemi beyaz pamuğunkine benzer. Akılda tutulması gereken en önemli şey, renkli pamukların dikim esnasındaki izolasyonudur. Bu izolasyon, beyaz pamuğun ve farklı renklere sahip diğer renk pamukların izolasyonunu içermektedir. Çapraz kirlenmeyi engellemek adına dikim izolasyon planı oldukça önemlidir. İzolasyon, bir örtme ağının kullanılması veya mesafeli dikim gibi fiziksel izolasyon yolları ile elde edilebilir. Birinci yöntem sadece küçük deneysel çalışmalar için uygundur. İkincisi ise ticari üretimde kullanılmaktadır [11].

Beyaz pamuğa kıyasla, renkli pamuk kullanmanın avantajı, düşük karbon ayak izinden kaynaklanmaktadır. Bu, renkli pamuk lifleri üretilirken ve kullanılırken herhangi bir kirlilik formunun da minimumda tutulacak olması anlamına gelmektedir. Öncelikle süreç böcekler, yabancı otlar ve hastalıklar da dâhil olmak üzere zararlılara karşı yerleşik bir direnç gösteren ekim çeşitliliği ile başlar. Daha sonra bütüncül bir haşere yönetimi sisteminin uygulanabileceği iyi bir büyüme ortamı geliştirmek ve bu ortamı sürdürmek ile devam ettirilir. Haşere kontrol uygulamalarında önce doğal ve biyolojik esaslar göz önünde bulundurulmalıdır. Pestisit uygulama oranları, insanlar ve hayvanlar için belirtilen minimum miktarda ve düşük toksisitede olmalıdır. Gübreleme için mümkün olduğunca organik gübreler tercih edilmelidir. En son aşamada ise yetiştirme koşulları optimize edilmelidir. Örneğin, alana farklı bir mahsul ekilmesi, yabancı otların kontrol altına alınmasında yardımcı olabilir. Uygulamaların, yerel koşullara göre optimize edilmesi gerektiği unutulmamalıdır [11].

Pamuk lifinin renkleri esas olarak genetik olarak belirlenmesine rağmen, güneş ışığı ve toprak türleri gibi çevre faktörleri de lif rengini, özellikle renk yoğunluğunu etkilemektedir. Aynı türde olup ancak farklı ortamlarda yetişen liflerin farklı renk yoğunluklarına sahip olması çok yaygın bir durumdur. Aynı alandaki bitkiler arasında ve bazen aynı bitkinin kozaları arasında lif renk ayrımı gözlemlenmek olağandışı değildir. Genel olarak, açık renk liflerin kalitesi beyaz liflerle kıyaslanabilirken, koyu renk liflerin kalitesi düşüktür. Kükürt içeren atmosfer veya

asit yağmuru lif renk gelişimini büyük ölçüde etkiler. Yüksek kükürtlü bir ortamda yetişen yeşil pamuk çeşidinden kahverengi lifler üretilebilir. Bu nedenle, elyaf geliştirme aşamasında kükürt içeren bir gübre veya böcek ilacı uygulaması sınırlandırılmalıdır. Hasat mevsimi boyunca yüksek nem oluşursa lif rengi değişebilir. Uygun olmayan bir saklama durumu da elyaf rengini değiştirebilir [11].

Yukarıda belirtildiği gibi, güneş ışığı etkisi pamuk liflerinin veya kumaşların doğal renklerini büyük ölçüde değiştirir. Yeşil renk kapalı ortam ışık koşullarında yavaş yavaş sarımsı yeşile, sonra da sarımsı kahverengiye dönüşecektir. Kahverengi pamukta, genellikle güneş ışığına maruz kalan ve güneş ışığına maruz kalmayan lifler arasında renk farkı görülmektedir. Güneş ışığına maruz kalan açık kahverengi, diğeri ise kırmızımsı kahverengi olmaktadır [11].

### 3. Doğal Renkli Pamuk Türleri

Doğal renkli pamuk, lümenin bir parçası olarak renkli pigment içeren liflerdir [12]. Şu anda doğal renkli pamuklar kahverengi ve yeşil olmak üzere iki büyük gruba ayrılmıştır. Her grup kendi altında, renk farkına göre alt gruplara ayrılabilir. Örneğin, kahverengi pamuklar için, açık kahverengi, kırmızımsı kahverengi, koyu kahverengi, vb. vardır (Şekil 1). Doğal renkli pamuklar, en yüksek varyasyon konvansiyonel pamuk *G. hirsutum*'da, ikincisi *G. arboreum*'da ve daha az olarak *G. barbadense* ve *G. herbaceum*'da bulunmak üzere yetiştirilen her dört *Gossypium* türünde de bulunmaktadır. Doğal renkli pamuklar Çin ve Hindistan başta olmak üzere 27 ülkede yetiştirilmektedir [11].



Şekil 1. Koyu kahverengi, açık kahverengi, koyu yeşil, açık yeşil, beyaz pamuk [11]

Doğal renkli pamukta bulunan pigmentler genellikle stabil değildir. Özellikle lif gelişimi döneminde (çiçek açılmasından koza olgunlaşmasına kadar) hava koşullarına bağlı olarak çevresel faktörlerden büyük ölçüde etkilenirler [11].

Renkli pamuklar arasında kahverengi en yaygın renktir. Kahverengi renk açık kahverengiden, yoğun maun kırmızısına kadar değişen farklı tonlarda bulunmaktadır. Rengin yoğunluğuna bağlı olarak, açık kahverengi, hâki/devetüyü rengi, kahverengi, koyu kahverengi / çikolata rengi, kirli gri, ten rengi ve kırmızı-kahverengi renkler mevcuttur. Kahverengi renk yeşil renge kıyasla daha stabildir. Sürekli güneş ışığına maruz kaldığında, kahverengi renk de solar, ancak bu solma yeşil renge kıyasla çok daha düşük hızla gerçekleşir [12].

Yeşil, pamukta yaygın olarak görülen ikinci önemli renktir. Yeşil renk kahverengiden daha az yaygındır ve esas olarak açık yeşil ve yeşil olmak üzere iki tonda ortaya çıkar. Yeşil renk solmaya daha meyilli olduğundan kahverengi renkten daha hızlı solmaktadır. Koza açılması sırasında güneş ışığına uzun süre maruz kalınması yeşilin hızla solmasına neden olur ve renk beyaz, kirli beyaz veya kahverengimsi olur. Yeşil renk çoğunlukla *G. hirsutum*'da gözlemlenir ve muhtemelen yeşil renk veren türler halen ticari tarım için serbest bırakılmamıştır [12].

### 4. Doğal Renkli Pamuğun Özellikleri

Renkli ve beyaz liflerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde farklılıklar vardır. Renkli lifler genellikle daha fazla miktarda vaks içerir, bu nedenle beyaz liflerden daha düşük emiciliğe sahiptir. Beyaz, kahverengi ve yeşil liflerin nem tutma özellikleri sırasıyla %8,5, %7,6 ve %5,1'dir [11]. Doğal renkli pamuğun nem emiciliğinin düşük olmasının sebebinin daha yüksek hidrofobik bileşenler olduğu ileri sürülmektedir. Geleneksel beyaz pamukla kıyaslandığında yeşil renkli pamukta yağ, lignin ve pektin çok daha yüksektir [13].

Beyaz pamuk lifleri içerisinde organik çözücü ile ekstrakte edilebilir madde miktarı %0,6 oranında iken yeşil pamuk liflerinde bu oran %14 ila 17 civarındadır. Bu nedenle yeşil pamuk lifleri beyaz liflerden daha pürüzsüz bir dokuya sahiptir [14].

Renkli pamuk lifi kalitesi son yirmi otuz yıldır önemli ölçüde iyileşmiş olsa da sürekli gelişen tekstil eğirme teknolojilerinin taleplerini karşılamak için daha iyi bir kaliteye sahip olması gerekmektedir. Beyaz pamukla karşılaştırıldığında doğal renkli pamuk genotiplerinin lifleri çok düşük kalitelidir. Doğal renkli pamuk lifleri beyaz pamuk liflerine göre daha kısa, daha dayanıksız ve daha az olgunlaşmıştır. Kahverengi pamuk liflerinin, üst yarı ortalama uzunlukları 22 mm'den az olup mukavemeti yaklaşık 15 cN/tex civarındadır. Koyu kahverengi pamuğun



hem lif kalitesinin hem de veriminin kahverengi veya açık kahverengi bir pamuktan daha kötü olmasının nedeni genellikle çok geç olgunlaşmasıdır. Yeşil pamuklar için ise elyaf üst yarı ortalama uzunluğu yaklaşık 25 mm, mukavemeti 11-18 cN/tex ve yaklaşık inceliği ise 2-2,5 mikroner indekstir [11]. Bu nedenle, özellikle yüksek hızda eğirme için uygun lif mukavemetini sağlamak üzere renkli pamuğun lif özelliklerini iyileştirmeye ihtiyaç vardır. Renkli *G. hirsutum* lif uzunluğu, mukavemeti ve renk haslığı gibi özellikleri açısından daha iyi sonuçlar elde etmek için beyaz renkli olanla çaprazlanmaktadır [12]. Renkli lifler sıklıkla beyaz liflerle ve bazen de sentetik liflerle karıştırılır. Renkli liflerin ve beyaz liflerin harmanlama oranlarının ayarlanmasıyla çok çeşitli renkler elde edilebilir [11].

Doğal pigmentli yeşil pamuk, rengini lifin dış tarafında selüloz katmanlarında bulunan suberin (balmumu) tabakasındaki sinamik asit türevi olan kafeik asitten almaktadır [15, 16]. Bu, floresan bir bileşiktir ve amacının tohumu korumak için UV radyasyonunu absorblama olduğu düşünülmektedir. Bu sonuç, doğal pigmentli yeşil pamuğun geleneksel ağartılmış pamuğa kıyasla üstün UV koruyucu özelliğe sahip olabileceği tartışmalarına yol açmıştır [17]. Kahverengi ve taba rengi pamuklar renklerini, yeşil pamuğun rengini aldığı suberin tabakası yerine lif hücrelerinin lümenindeki tanen hücrelerinden almaktadır [18]. İnce tabaka kromatografi analizi (TLC) ile renk pigmentinin tanen türevleri olduğu ortaya koyulmuştur. Kahverengi renk, lifler oksijene ve güneş ışığına maruz kalana kadar oluşmaz, tohum kabuğu açıldığında renk meydana gelir. Bir diğer ilgi çekici nokta ise doğal pigmentli pamukların UV koruyucu özelliklerinin stabilitesinin uzun süreli olmasıdır [17].

Doğal renkli pamuğun diğer özellikleri arasında, geleneksel beyaz pamuğa göre daha fazla ağır metal içermesi nedeniyle aleve dayanıklılığının daha fazla olması ve daha yüksek sınırlı oksijen indeksi değerine sahip olmasıdır [19].

Bilindiği gibi bir lifin tekstil açısından en önemli özellikleri higroskopik nem içeriği, yabancı madde içeriği, inceliği, mukavemeti ve uzunluğudur. Tablo 1'de beyaz ve renkli pamuk liflerinin söz konusu özellikleri karşılaştırılmaktadır.

**Tablo 1.** Beyaz ve renkli pamuk liflerinin çeşitli lif özelliklerinin karşılaştırılması [7, 11, 14, 19]

Lif özelliği	Karşılaştırma
Su emiciliği	Beyaz Pamuk > Renkli Pamuk
Higroskopik nem içeriği	Beyaz Pamuk > Renkli Pamuk
Organik çözücü ile ekstrakte edilebilir madde miktarı	Beyaz Pamuk < Renkli Pamuk
Lif inceliği (Mikroner indeks)	Beyaz Pamuk > Renkli Pamuk
Lif mukavemeti (cN/tex)	Beyaz Pamuk > Renkli Pamuk
Stapel uzunluğu (mm)	Beyaz Pamuk > Renkli Pamuk
Yanıcılığı	Beyaz Pamuk > Renkli Pamuk

Tablo 1'den görülebileceği üzere renkli pamuk lifleri bütün özellikleri açısından beyaz pamuk liflerine kıyasla dezavantajlıdır.

Beyaz pamuk çeşitlerine göre doğal renkli pamukların çeşitli avantajları vardır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

**İnsan Sağlığına Etkisi:** Sentetik boyarmadde içeren pamuklu kumaşların cilt ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Sentetik boyarmaddeler ciltte alerjiye ve kaşıntıya neden olabileceği gibi bazen cilt kanserine dahi neden olabilir. Doğal renkli pamuk liflerinden mamul edilen kumaşlarda bu tür olumsuz etkiler ortadan kaldırılmaktadır. Bu kumaş, hassas cilde sahip olan kişiler tarafından bile güvenle kullanılabilir [12].

**Çevreye Etkisi:** Doğal renkli pamuklar, kimyasal boyaların kullanılmamasının yanı sıra pestisitlerin kullanımının azaltılması sayesinde ekoloji ve çevre açısından güvenli olmaları nedeniyle popüler hale gelmiştir. Ticari beyaz pamuk ise dünyada pestisite en çok ihtiyaç duyan mahsuldür. Dünyadaki tarım arazilerinin sadece %3'ünü işgal etmesine rağmen, böcek ilaçlarının %25'inden fazlasını ve dünya çapında kullanılan pestisitlerin %12'sini tüketmektedir. Dünya Bankası, endüstriyel su kirliliğinin yaklaşık %20'sinin tekstil boyama işleminden kaynaklandığını tahmin etmektedir. Ayrıca su kaynakları içerisinde sadece tekstil boyamasıyla ilgili 72 toksik kimyasal belirlenmişlerdir. Doğal renkli pamuk kullanımı, sentetik boyarmaddelerin neden olduğu çevre kirliliğinin ve çiftçilerin ve toplumların sağlığı için oluşan risklerin azaltılmasına yardımcı olur [20].

**Kumaş Üretim Maliyetine Etkisi:** Doğal renkli pamuğun en önemli özelliklerinden birisi, boyama işleminin olmaması ve boyahanede bazı ön işlemlerin atlanmasıdır. Böylece kimyasal işlem sayıları sınırlandırıldığında daha az su kullanımı, daha az atık su, kimyasalların daha az tüketimi, daha kısa işlem süreleri, daha az enerji kullanımı gibi sonuçlar olacaktır. Bunlar maliyet avantajı yanında, çevre korumaya da büyük katkıda bulunacaktır [8].

**Yıkamanın Pamuk Rengi Üzerine Etkisi:** Doğal renkli pamukların yıkanması sonucu elde edilen rengin konvansiyonel boyama ile elde edilen renklerin yıkanması sonucu elde edilene göre oldukça farklı olduğu söylenebilir. Doğal renkli pamuklu kumaşlar yıkama sonrası konvansiyonel boyama sonucu elde edilene göre her yıkamada haslığını ve renk yoğunluğunu geliştirir. Literatür ve yapılan araştırmalar, renkli pamuklu kumaşların yıkanmasının rengini yoğunlaştırdığını göstermiştir [21].

Öte yandan doğal renkli pamukların bazı dezavantajları vardır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

**Düşük Verim Potansiyeli:** Hâlihazırda mevcut olan renkli pamuk genotiplerinin verim potansiyeli çok düşüktür. Verim potansiyeli, beyaz pamuk çeşitlerinin neredeyse yarısıdır. Düşük verim potansiyeli nedeniyle, doğal renkte pamuk ticari tarım için popüler değildir. Başka bir deyişle, doğal renkli pamuğun düşük verim potansiyeli yetiştiriciliğinin yaygınlaşmasında bir bariyer etkisi göstermektedir [12].

**Kötü Lif Özellikleri:** Beyaz pamukla karşılaştırıldığında doğal renkli pamuk genotiplerinin lifleri daha düşük (stapel uzunluğu daha kısa, lif mukavemeti ve mikroner indeksi daha düşük) kalitededir. Renkli pamuğun bu özellikleri özellikle ticari olarak eğirme için uygun değildir ve geliştirilmeye ihtiyacı vardır [7]. Genel olarak renkli pamuğun özelliklerinin beyaz pamuktan %10 daha düşük olduğu ortaya koyulmuştur. Daha yüksek renk yoğunluğu eldesi odaklı genetik seçimin (seleksiyonun) lif üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu düşünülmektedir [22].

**Sınırlı Renkler:** Şu anda germplazmada bulunan doğal renkli pamuk genotipleri sınırlı renklere sahiptir. Kahverenginin çeşitli tonları ve yeşil olmak üzere sadece iki renk vardır. Sadece iki renkle, doğal renkli pamuğun beyaz pamukla rekabet etmesi düşünülemez [12].

**Renklerin İstikrarsızlığı:** Doğal renkli pamuğun rengi sabit ve uzun ömürlü değildir. Tüm renkler güneş ışığında solma gösterebilmektedir. Güneş ışığında, yeşil renk kahverengi renkten daha hızlı solmaktadır. Kahverengi rengin solması ise oldukça yavaş bir hızda gerçekleşmektedir. Doğal renkli yeşil pamuğun güneş ışığına maruz kalan bölgesi neredeyse beyaz olur ve koza içinde kalan kısmı ise koyu yeşil kalır [7]. Renkli pamuk lifinin rengi üretimde ve uygulamada koyudan açığa doğru değişir ve renksizleşme ve rengin kirlenmesi problemleri ortaya çıkar [23].

**Kontaminasyon:** Doğal pamuk rengi, baskın / tamamlanmamış baskın genler tarafından yönetilir. Yeşil renk bir gen tarafından kontrol edilirken kahverengi renk iki veya daha fazla gen ile kontrol edilmektedir. Pamuk genellikle çapraz tozlaşan bir üründür. Doğal koşullarda, çapraz tozlaşma %5-20 oranında gerçekleşir. Yakınlarda renkli ve beyaz pamuğun yetiştirilmesi, beyaz pamuk genotiplerinin renkli genotiplerle, veya tersi, kontaminasyon ihtimalini artıracaktır. Bir önceki yıl renkli pamuğun yetiştirildiği alanda beyaz pamuğun yetiştirilmesi de kontaminasyona neden olabilir. Bu nedenle, renkli pamuk ekimi sadece küçük alanlarla sınırlandırılmalıdır [12].

**Düşük Piyasa Talebi:** Son yıllarda, doğal renkte pamuk talebi, bazı Avrupa ülkelerinde artmaktadır, bu da yılda yaklaşık 5-6 yüz bin balyadır. Düşük talebe bakıldığında, renkli pamukların yetiştirilmesinin sınırlı alanlarla ve sadece kayıtlı yetiştiricilerle sınırlandırılması uygun olacaktır. Bu, doğal renkli pamuk üreticilerinin, renkli pamuğun muhtemel aşırı üretimi ve çok az talep görmesi veya hiç talep görmemesi nedeniyle, yok olmasının önlenmesine yardımcı olacaktır [12].

**Pazarlama Olanakları Eksikliği:** Doğal renkli pamuk satışı için uygun pazarlama eksikliği vardır. Ticari ölçekte renkli pamuk yetiştiriciliğine başlamadan önce pazarlama imkânlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Doğal renkte pamuk üretimi için alıcı ile üretici arasında yazılı bir anlaşma olmalıdır [12].

Tablo 2’de renkli pamuk liflerinin beyaz pamuğa kıyasla avantaj ve dezavantajları özetlenmektedir.

**Tablo 2.** Beyaz ve renkli pamuk liflerinin çeşitli lif özelliklerinin karşılaştırılması [7, 8, 12, 17, 20, 21]

Avantajları	Dezavantajları
Çevre kirliliğine olumsuz etkisi beyaz pamuğa göre daha azdır.	Lif üretim verimi beyaz pamuk ile kıyaslandığında daha düşüktür.
Yıkama sonrası renk solması boyanmış beyaz pamuğa kıyasla daha azdır.	Işık ile renk solması boyanmış beyaz pamuğa kıyasla daha fazladır.
UV koruma özelliği beyaz pamuğa göre daha fazladır.	Genel lif özellikleri (incelik, uzunluk, mukavemet vb.) beyaz pamuğa kıyasla daha kötüdür.
Cilt ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri boyanmış beyaz pamuğa kıyasla daha azdır.	Beyaz pamukta boyama ile istenilen her renk elde edilebilirken renkli pamuklar sınırlı renklere sahiptir.
Kumaş üretim maliyeti, gördüğü işlemlerin daha az olması nedeniyle beyaz pamuğa kıyasla daha düşüktür.	Piyasada doğal renkli pamuğa olan talep daha düşük olup renkli pamuk satışı için uygun pazarlama eksikliği vardır.

## 5. Doğal Renkli Pamuğun Tekstil Özellikleri Hakkında Yapılan Önceki Çalışmalar

Literatürde Christidis ve Harrison'ın 1955 yılında yaptıkları bir çalışmaya ilişkin verilen özet bilgide, Christidis ve Harrison'ın pamukta renkliliğin istenen bir özellik olmadığını, kahverengi ve yeşil renk ile ilgili genlerin birim uzunluk başına ağırlık bakımından lif gelişimini engelleyebileceğini bildirdikleri ifade edilmiştir. Bu araştırmacılar, aynı zamanda genellikle renk ve lif uzunluğu arasında negatif bir korelasyon olduğunu vurgulayarak özellikle de yeşil liflerin düşük lif indekslerine ve yüksek mum içeriklerine sahip olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca, eski Sovyetler Birliği'nde beyaz lifli standart çeşitler kadar iyi kaliteli renkli pamukların seleksiyon ile geliştirildiğini de ifade etmişlerdir [24].

1982 yılında Sally Fox, Wickenburg ve Arizona'da doğal renkli pamuğun uzunluğunu ve mukavemetini geliştirmek için bir ıslah ve seleksiyon çalışmasına başlamıştır. 1988 yılında Sally Fox, makinede başarıyla eğrilebilecek uzunlukta doğal renkli pamuk hibritleri geliştirmiştir. Sally Fox, doğal renkli pamuk şirketini kurarak ıslah ettiği pamuk çeşitlerini; FoxFibre®, Fox markets, FoxFibre® Green, Coyote Brown, Buffalo Brown ve Palo Verde Green olarak tescil ettirmiştir [21].

**Yatsu, Espelie ve Kolattukudy (1983)** yaptıkları çalışmada elektron mikroskobu yardımı ile yeşil pamuk lifi içinde suberin varlığını araştırmışlardır. Yeşil pamuk (*Gossypium hirsutum L.*) liflerinin hücre lümeni çevresinde çok sayıda ince eş merkezli halkaya sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu halkaların, suberine benzer karakteristikte ince bir yapıya sahip olduğu bulunmuştur. LiAlD<sub>4</sub> depolimerizasyonu ve gaz kromatografisi-kütle spektrometrisi analizi ile bulunan başlıca alifatik monomerler olan hidroksikokosanoik asit (%70) ve dokosanedoik asit (%25), yeşil pamukta suberin polimerinin varlığını göstermiştir [14].

**VanZandt, Horridge ve Dever (1997)** tarafından yapılan bir çalışmada binek araç ve uçak koltuğu döşemeleri için doğal renkli pamukların kabul edilebilirliklerini belirlemek amacıyla (302 Motorlu Taşıt Güvenliği Standardına göre) iki doğal renkli pamuktan elde edilen dimi konstrüksiyona sahip dokuma kumaşın alev direnci ve fiziksel özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada ayrıca pamuk tipi, alev geciktirici kimyasal konsantrasyonu ve kuru temizleme parametrelerinin kumaşların alev direnci ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Çakal ve bufalo kahverengisi pamuk liflerinden yapılan dimi kumaşların, 302 Motorlu Taşıt Güvenliği Standardı gereksinimini karşılamak için gerekli olan yanma performansını (4,4-4,5 cm/dk.) sağladığı tespit edilmiştir [25].

**Dickerson, Lane ve Rodriguez (1999)** tarafından yapılan bir çalışmada çeşitli yıkama kimyasallarının (optik deterjanlar, fosfat, klor ve kloruz ağartıcılar) doğal renkli pamuk liflerinden üretilmiş kumaşların renk değişimi ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır [7].

**Richards, Rowe ve Stankovic Elesini (1999)** tarafından yapılan bir çalışmada, bazı Amerikan doğal renkli pamuk çeşitlerinin yapısal ve mekanik özellikleri nicel olarak değerlendirilmiştir. Liflerin sekonder çeperinin alternatif selüloz katmanlarından ve suberin adı verilen mumsu bir organik maddeden oluştuğunu ileri süren doğal renkli yeşil pamukların morfolojisi üzerine daha önce yapılan çalışmadan yola çıkan Richards, Rowe ve Stankovic, suberin yüzdesini belirlemek için, pamuk numunelerini etanol ile ekstrakte etmiştir. Lif şişmesinden elde edilen veriler, yeşil pamuk elyafının büyük oranda suberin içerdiğini göstermiştir. Doğal renkli liflerin, kabul edilebilir seviyede özelliklere sahip olmalarına rağmen, geleneksel beyaz liflerden daha düşük mukavemet ve kopma yüzdesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca renkli elyaf kristalinitesinin beyaz elyaftan daha düşük olduğu ancak yeşil renkli elyafın kahverengi ve beyaza nazaran daha da düşük olduğu saptanmıştır. Bunun nedenin ise sekonder çeperdeki alternatif suberin ve selüloz katmanlarının, kristalitlerin gelişimini inhibe etmesi olabileceği düşünülmüş, yeşil elyaf etanol ile tamamen ekstrakte edildiğinde kristalinitenin kahverengi ve beyaz elyaf değerlerine yaklaştığı gözlemlenmiştir [26].

**Gürel, Akdemir ve Karadayı (2001)** doğal renkli elyafı pamuk genotiplerinin değerlendirilmesini amaçlamıştır. Ege Bölgesinde Menemen, Ödemiş ve Nazilli'de iki yıl süre ile gerçekleştirilen araştırmada, 4 kahve ve 2 yeşil renkli hattı içeren 6 adet renkli pamuk genotipi, 3 beyaz elyafı kontrol pamukları ile denemeye alınmıştır. Projede pamukların lif uzunlukları, incelikleri ve mukavemetleri kıyaslanmıştır. Proje sonucunda deve tüyü hattı 33,9-30,2 mm lif uzunluğu ve 290-219 kg/da kütlü verimi vermiştir. Kahve renkli hattın ise 26,0-25,9 mm lif uzunluğuna ve 458,0- 376,1 kg/da kütlü verimine sahip olduğu belirlenmiştir. Yeşil renkli elyafı pamuklar ise, diğer pamukların gerisinde kalmıştır [24].

**Parmar ve Chakraborty (2001)** tarafından yapılan bir çalışmada, devetüyü ve zeytin yeşili doğal renkli pamuklarla, beyaz pamuk liflerinin fiziksel özellikleri, ağır metal içerikleri tespit edilmiş ve kıyaslanmıştır. Doğal renkli pamuklar ile beyaz pamuk karşılaştırıldığında, renkli pamuğun lif uzunluğu ve mukavemetlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun doğal renkli pamukların ağır metal içeriğinin fazla olmasından ve içerdiği kül miktarının diğerlerine göre yüksek olmasından kaynaklandığı savunulmuştur. Doğal renkli pamukların yanma davranışları incelendiğinde limit oksijen indeksi değerinin beyaz pamuklara göre yüksek olduğu ve dolayısıyla da

tutuşabilirliklerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca beyaz pamuğun, diferansiyel taramalı kalorimetre çalışmalarında selüloza ve hemiselüloza ayrışması ve buharlaşarak bozulması yaklaşık 370°C civarında gerçekleşirken, bu değer in doğal renkli pamuklar için 390°C civarında olduğu gözlemlenmiştir [19].

**Price, Cui ve Calamari (2001)**, Arizona Üniversitesi tarafından yetiştirilen doğal açık tarçından yeşil renge kadar değişen dört pamuk çeşidinin endüstriyel aletler kullanılarak çırçırlandı ve eğirilerek ring ve rotor ipliklerine dönüştürüldüğünü belirtmişlerdir. Pamukları karşılaştırmak için lif ve iplik testleri uyguladıklarını ve ipliklerin dokuma fabrikasına dokunmak üzere gönderildiğini bildirmişlerdir. Mikroner değerinin renk tonunu değiştirdiğine dair bulgular saptamışlardır. Araştırmalar sonucunda en düşük mukavemetli ve en kısa pamuk lifi olan koyu tarçın renkli pamuk liflerinden üretilen ipliğin en dayanıksız ve en düzensüz olduğu saptanmıştır. Dört farklı doğal renkli pamuk kıyaslandığında en uzun, kaba ve dayanıklı çeşidin şampanya renkli pamuk olduğu ve en sağlam ve en düzgün ipliklerin doğal yeşil renkli pamuklardan elde edildiği söylenebilir. Çalışmada dayanım ve iplik düzgünlüğü yönünden doğal açık tarçın ve şampanya renkli pamukların benzerlik gösterdiği belirtilmiştir [27].

**Hustvedt ve Crews (2005)** tarafından yapılan çalışmada üç renkte (yeşil, taba ve kahverengi) doğal pigmentli pamuğun ultraviyole koruma (UPF) değerlerinin yanı sıra ışığa maruz kalma ve yıkama işleminin doğal pigmentli pamuğun UV koruyucu özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ksenon ışığına maruz kalma ve yıkama sonucunda, doğal pigmentli pamuğun solduğu tespit edilmiş olsa da tüm tonlar için UV koruma faktörünün yeterince yüksek olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak doğal pigmentli pamuklardan elde edilen kumaşların, geleneksel pamuktan (ağartılmış veya ağartılmamış) elde edilen kumaşlara göre önemli ölçüde daha yüksek UV koruma faktörü sergilediği görülmüştür [17].

**Gu (2005)**, NaOH çözeltisi kullanarak doğal olarak yeşil renkli pamuğun nem emiciliğini iyileştirmeye çalışmıştır. Hidrofobik bileşenlerin NaOH çözeltisi ve damıtılmış ılık suyla uzaklaştırılmasından sonra, doğal renkli yeşil pamuğun nem geri kazanımının, beyaz pamuğun nem emiciliğine benzer şekilde %8,81'e yükseldiğini saptamıştır [28].

**Matusiak ve ark. (2007)** tarafından yapılan çalışmada Yunan menşeli kahverengi pamukların elyaf özelliklerinin, farklı eğirme teknolojileri kullanılarak elde edilen ipliklerin özelliklerinin ve bu ipliklerden elde edilen kumaşların yapısal/mekaniksel özellikleri (mukavemet, uzama) ile termofizyolojik özelliklerinin (hava geçirgenliği, hidrofilité, termal konfor) tespiti gerçekleştirilmiştir. Yunan menşeli kahverengi pamuğun, düşük olgunluk, yüksek neps, çöpel ve toz özelliklerine sahip olmasına rağmen, OE iplik üretiminde kullanılabileceği belirtilmiştir. Ancak doğal renkli pamuktan üretilen OE ipliğ in kalitesinin ipliğe verilecek olan büküm miktarına bağlı olduğu vurgulanmıştır. Kahverengi pamuktan üretilen düşük mukavemetli ipliğ in dokumada çözgü ipliğ i olarak kullanılmasında herhangi bir sorun olmayacağı, ancak çözgü ipliğindeki düşük mukavemetli kahverengi pamuk liflerinin yıkanan kumaşların çözgü yönündeki dayanımında belirgin düşüşe yol açabileceği belirtilmiştir. Bunun ötesinde renkli pamuk ve renkli pamuk karışımlarından yapılan kumaşların termal özelliklerinin beyaz pamuktan yapılmış olanlara benzediği, ancak kahverengi pamuktan yapılan kumaşların beyaz pamuktan üretilenlere göre daha yumuşak tutuma sahip olduğu ifade edilmiştir [29].

**Üte ve ark. (2008)** yaptığı çalışmada doğal renkli pamuk lifi ile Angora tavşanı lifini farklı oranlarda karıştırarak iplikler üretmiş ve bu ipliklerden çift yüzü lü örme kumaşlar elde etmiştir. Bu kumaşlardan birincisi tene temas edecek yüzeyin %100 doğal renkli pamuk, diğer yüzeyin angora / doğal renkli pamuk karışımı olacak şekilde üretilmiştir. İkinci kumaş kontrol numunesi olup her iki yüzeyinde de %100 doğal renkli pamuk kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kumaşların ısı l konforları ölçülmüş, farklı yüzlerin iç veya dış katman olarak kullanılmasının ve değişik angora oranının bu özelliklere etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada angora / pamuk karışım oranının iplik özellikleri üzerine etkileri de irdelenmiştir. Buna göre Angora elyaf oranı belli bir yüzdeye kadar doğal renkli pamuk elyafının özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olurken belli bir karışım yüzdesinden sonra elyaf özelliklerini ilk değerlerinden daha kötü bir duruma getirdiğini göstermiştir [30].

**Kang ve Epps (2009)** yaptıkları çalışmada enzimatik işlemin üç farklı doğal renkli pamukta düşük nem geri kazanımını iyileştirip iyileştiremeyeceğini incelemiştirlerdir. Enzimatik işlemden sonra renkli pamukların ağırlığında artış saptamışlardır. Bu artışın nedenini belirlemek için nem geri kazanım testi uygulanmış ve üç doğal renkli pamuğun nem geri kazanımının bazik işlem sonrasında arttığı ve enzim işleminde sonra daha da arttığı görülmüştür. İstatistiksel sonuçlar, lipazın kahverengi pamuklar için en az etkili ve yeşil pamuk için en etkili enzim olduğunu göstermiştir. Çoklu enzim muamelesi için, amilaz içeren işlemlerin en çok kahverengi pamuklar için ve lipaz içeren işlemlerin en çok yeşil pamuk için etkili olduğu tespit edilmiştir [13].

**Chen ve Cluver (2010)** yaptıkları araştırmada, toprak altına gömme ve laboratuvar küf kültürü koşulları altında konvansiyonel beyaz ve boyalı pamuğa kıyasla doğal renkli pamuğun biyodegradasyon ve küf direnci özelliklerini incelemiştirlerdir. Laboratuvar küf kültürü sonuçları doğal kahverengi ve yeşil renkli pamuklu kumaşların *Aspergillus niger* 'in büyümesine karşı direnç gösterdiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, toprak altında 28 gün bekletildikten sonra, doğal renkli pamukların, boyanmış veya boyanmamış konvansiyonel beyaz

pamuklara göre daha iyi fiziksel görünümüne sahip olmalarına karşın, doğal renkli pamuk numuneleri belirgin bir mukavemet kaybına uğramış ve numunelerden alınan lifler yapısal hasara uğramıştır. Bu, doğal renkli pamukların biyolojik olarak parçalanabileceğini, ancak boyanmış veya boyanmamış konvansiyonel pamuklara göre daha düşük bir hızda (özellikle yeşil renkli pamukta daha belirgin olmak üzere) meydana geleceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, doğal yeşil pamuğun toprak altına gömme koşulları altında doğal kahverengi renkli pamuktan daha az bozulmasının nedeni, kahverengi pamukların beyaz türlere daha benzer bir yapıya sahip olmasına karşın, yeşil pamukların ise önemli ölçüde farklı olmasına dayandırılmıştır. Doğal yeşil renkli pamuk, doğal kahverengi renkli pamuktan daha pürüzsüz bir yüzey yapısına ve çok daha yüksek vaks içeriğine sahiptir. Doğal renkli pamukların boyanmış pamuğa göre daha yavaş bir hızda biyobozunur olması ise, pamuğu boyamak için kullanılan boyaların çoğunun azo esaslı direkt ve reaktif boyalar olmasıyla açıklanmıştır. Bu boyaların, aerobik veya anaerobik bakteriler tarafından kolayca indirgenen veya yükseltgenen bir azo bağı, -N=N- içermelerine karşın, doğal renklendiricilerin daha karmaşık olması, doğal renkli pamukların aerobik veya anaerobik bakteriler yoluyla indirgenmeleri ve / veya oksidasyona uğramalarının daha zor olmasının nedeni olarak gösterilmiştir [31].

**Değirmenci, Kireçci ve Kaynak (2010)** doğal devetüyü rengindeki ve beyaz renkteki pamuktan üretilmiş dokuma ve örgü ipliklerinin özelliklerini incelemiş ve bunları kumaş haline getirmiştir. Yapılan haslık testleri doğal renkli pamuklardan üretilen kumaşların ışık haslığı dışında kalan tüm haslıklarının beyaz pamuktan üretilip boyanmış olan kumaşın haslık değerlerine yakın veya daha iyi olduğunu göstermiştir [5].

**Chae, Lee ve Cho (2011)** doğal renkli organik pamuğun mekanik özelliklerinin dokusal duyuşal algılar açıdan incelenmesi için bir çalışma yapmıştır. İki tür, kahverengi ve yeşil renkli pamuk lifleri seçilmiş ve bunlar bezayağı ve dimi kumaşlar halinde dokunmuştur. Mekanik özellikler Kawabata Handle (KES-FB) sistemi ile değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, renkli pamuktan üretilen kumaşların mekanik özellikleri ve dokusal duyuşal algıları incelenmiştir. Araştırmacılar, dört farklı doğal renkli organik pamuklu kumaşın kesme, yüzey, sıkıştırma özellikleri ve ağırlığı arasında önemli farklılıklar olduğu sonucuna varmıştır. Tutum özelliği açısından kahverengi renkli pamuktan üretilen dimi kumaşın bayan yazlık elbisesi için en uygun olduğu sonucuna varılmıştır [32].

**Ma ve ark. (2013)** yaptığı çalışmada doğal renkli pamukların antibakteriyel özelliklerini araştırmıştır. Geleneksel beyaz pamukla karşılaştırıldığında, kahverengi pamuğun iki bakteri türü olan *Staphylococcus aureus* ve *Klebsiella pneumoniae* ile temas ettiğinde sırasıyla %89,1 ve %96,7 azalma oranı ile mükemmel antibakteriyel aktivite sergilediği, yeşil pamuğun antibakteriyel etkisinin ise zayıf olduğu bulunmuştur. Renkli pamukların antibakteriyel mekanizmasını araştırmak için, disk difüzyon yöntemi kullanılarak antibakteriyel aktivitelerinin belirlenmesi için renkli liflerden pigmentler ekstrakte edilerek kimyasal yapıları analiz edilmiştir. Sonuçta kahverengi pamuk liflerinden gelen pigmentin iki bakteri türüne karşı önemli bir aktivite gösterdiği, buna karşın yeşil pamuk lifinden gelen pigmentin sergilediği aktivitenin önemsiz olduğu görülmüştür. Bu durum, renkli pamuk liflerinin antibakteriyel etkinliğinin yapısındaki pigmentin kimyasal yapısı ile yakından ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Analiz sonuçları kahverengi pamuktaki pigmentin kondanse tanenlere ait olduğunu ve yeşil pamuktan elde edilen pigmentin ise flavonoid olarak tanımlandığını göstermiştir. Yüksek sıcaklık muamelesinin kahverengi pamuktan ekstrakte edilen pigmentin antibakteriyel aktivitesi üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Genel olarak yüksek sıcaklık fiksaj işlemlerinin antibakteriyel aktiviteyi azalttığı, ancak antibakteriyel aktivitenin hâlâ tatmin edici bir seviyede olduğu görülmüştür. Bu durum kahverengi pamuğun yüksek sıcaklıktaki fiksaj işlemleri sonrası bile kalıcı antibakteriyel performans gösterebildiğini ortaya koymaktadır [33].

**Hinchliffe ve ark. (2015)** yaptıkları bir karşılaştırmalı çalışmada, beyaz renkli pamuk ve doğal renkli kahverengi pamuk elyafından iğneleme ve su jeti yöntemi ile üretilmiş dokusuz kumaşların fiziksel ve yanma özelliklerini araştırmışlardır. Kahverengi pamuk elyafından üretilen kumaşlarda beyaz liflere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek alev geciktirme derecesi gözlenmiştir. Element analizleri, kahverengi pamuk liflerinde, fosfor ve magnezyum dâhil olmak üzere bilinen alev geciktirici elementlerden yüksek seviyede bulunduğunu ortaya koymuştur. Kahverengi pamuk elyafından iğneleme ve su jeti yöntemi ile üretilmiş dokusuz kumaşların yanma sürelerinin, yapılan 45°'lik yanma testleri sonucunda, beyaz kumaşa göre, sırasıyla 30 ve 4 kat daha uzun süreye sahip olduğu tespit edilmiştir. Su jeti yöntemi ile üretilmiş dokusuz kumaşların yanma süresinin azalmasının ana nedeninin ise fosfor içeriğinin azalması olduğu ifade edilmiştir [34].

**Ma ve ark. (2016)** yaptıkları diğer bir çalışmada ise doğal kahverengi renkli pamuk liflerinin antioksidan özelliklerini araştırmışlardır. Doğal kahverengi renkli pamuğun antioksidan özelliklerinin beyaz pamuğa göre anlamlı derecede yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Liflerdeki fenolik pigment bileşimin antioksidan özelliklere katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Bu eşsiz özelliğin, yıkamadan sonra da kalıcı olduğu bildirilmiştir [35].

**Gülümser (2016)** yaptığı çalışmada doğal kahverengi renkli pamuklu örme kumaşın, beyaz pamuklu örme kumaşla boyahanedeki proses adımları ve maliyet açısından bir kıyaslamasını yapmıştır. Hesaplamaları kumaşların üretimdeki işlem adımlarını göz önüne alarak gerçekleştirmiştir. Doğal renkli pamuk yıkama ve

yumuşatma adımları açısından değerlendirilmiştir. Beyaz pamuklu kumaş doğal renkli pamuk ile laboratuvarda aynı renkte boyanmış ve ağartma, boyama, yıkama ve yumuşatma adımları açısından kıyaslanmıştır. Hesaplamalar ve kıyaslamalar enerji, su, işgücü, elektrik, kimyasal, yardımcı madde ve boyarmadde maliyetleri dikkate alınarak yapılmıştır. Sonuç olarak doğal renkli pamuklu kumaşın beyaz pamuklu kumaşa kıyasla boyahanedeki işlemlerinin 2,9 kat daha ucuz olduğu ifade edilmiştir [8].

**Nam ve ark. (2016)**, kahverengi pamuğun rengiyle ilişkili olduğu bilinen kondanze tanenlerin varlığını farklı seviyelerde inorganik bileşenler, kristalinite ve tanen içeren iki seçilmiş kahverengi pamuk genotipini (SA-1 ve MCBL) kullanarak <sup>13</sup>C NMR analizi ile doğrulamıştır. İnorganik elementlerin ve tanenlerin etkilerini, lifleri çeşitli çözeltilerde yıkamadan önce ve yıkamadan sonra, termogravimetrik analiz (TG) ve mikro ölçekli yanma kalorimetrisi (MCC) parametreleri ile analiz etmişlerdir. Bu araştırmaların sonuçları, daha önceki çalışmalarda önerilen faktörler hakkında fikir sahibi olunmasını sağlamıştır. Buna göre inorganik bileşenler, pamuk lifinin termal özelliklerini etkilemede kristallikten daha baskındır ve kondanze tanenler metal iyonlarını ve iç termal direnci adsorbe etme yetenekleri nedeniyle kahverengi pamuğun daha yavaş yanmasına katkıda bulunmaktadır [36].

**Rathinamoorthy ve Parthiban (2019)** tarafından yapılan bir çalışmada kahverengi renkli pamuk ipliği rotor eğirme teknolojisi kullanılarak eğrilmiş ve iplik özellikleri analiz edilmiştir. Dokuma tekniği kullanılarak üç farklı kumaş tipi geliştirilmiş ve geliştirilen kumaşların yırtılma mukavemeti, buruşma geri kazanımı, sertlik, hava geçirgenliği, aşınma ve boncuklanma direnci gibi fiziksel özellikleri değerlendirilmiştir. Süblimasyon, yıkama ve ışığa karşı renk haslığı gibi haslık özellikleri de incelenmiş ve sonuçlar umut verici bulunmuştur [12].

**Günaydın ve ark. (2019)** yaptığı çalışmada iki beyaz pamuk çeşidi ve üç doğal renkli kahverengi pamuk çeşidinden elde edilen karde ipliklerle bezayağı, dimi ve ribs olarak dokunmuş kumaşlarda pamuk tipinin kumaşın bazı mekanik özelliklerine ve hava geçirgenliğine olan etkileri araştırılmıştır. İplik ve kumaş özellikleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler beyaz ve doğal renkli pamuktan üretilmiş kumaş numunelerinin bazı mekanik ve hava geçirgenliği özellikleri açısından önemli farklılıklara sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, beyaz ve doğal renkte organik Türk pamuğu kullanılan kumaşlarda, tatmin edici mekanik özellik ve hava geçirgenliği seviyeleri elde edilmiş, bu da bu numunelerin üst giyim alanı için kullanılabilceğini ortaya koymuştur [37].

## 6. Sonuç

Katma değeri düşük basit-sıradan mallarla Uzakdoğu ile rekabetin zor olduğu günümüz koşullarında tekstil üretiminin odaklanması gereken önemli bir alan yenilikçi niş ürünlere yönelmektir. Söz konusu yenilikçi ürünler uygun pazarlama stratejileri ile de birleştirildiğinde yüksek gelir eldesi konusunda önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu açıdan beyaz pamuğa alternatif bir ürün olarak sunulan doğal renkli pamuğun bunu yetiştiren ve bitmiş ürüne kadar dönüştürerek pazarlayan ülkelere önemli ekonomik kazanımlar sunduğu söylenebilir. Bugün renkli pamuktan üretilmiş bir ipliğin benzeri kalitedeki bir beyaz pamuk ipliğine göre 8-10 kat daha yüksek fiyata satıldığı dikkate alındığında durum daha net bir şekilde anlaşılabilir.

Renkli pamuk her ne kadar daha düşük lif üretim verimi, daha kötü fiziksel-teknolojik özellikler (incelik, uzunluk, mukavemet vb.), ışık ile daha yüksek renk solması, sınırlı renklere ve kısıtlı bir pazara sahip olma gibi dezavantajlar içerse de; çevre kirliliğine ve insan sağlığına olumsuz etkisinin daha az olması, bu liflerden üretilen kumaşın işlem maliyetinin, yanıcılığının ve yıkama sonrası renk solmasının daha az olması ve daha yüksek UV koruma özelliğine sahip olması gibi önemli avantajlar sunduğu göz ardı edilmemelidir. Öte yandan çevre dostu üretimin büyük önem kazandığı günümüz koşullarında atık yükü oluşturmayan yeni proseslerin ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi artık bir zorunluluk haline gelmeye başlamıştır. Terbiye prosesleri arasında en fazla atık yükü oluşturan boyama işlemlerini ortadan kaldırmanın ve böylece önemli çevresel avantajlar elde etmenin bir yolu doğal lifin renkli olarak yetiştirilmesidir. Renkli pamuk üretimi her ne kadar uzun yıllar önce başarılmış bir konu olsa da literatür incelendiğinde renkli pamukların başta mekanik özellikler açısından beyaz pamuğa göre geride kalıyor olması bu liflerin yaygın kullanımı üzerinde önemli bir engel teşkil ettiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, bir yandan renkli pamuk yetiştiriciliği konusunda bu liflerin tekstil alanında kullanılabilirliğini engelleyen sorunlara çözüm üretecek araştırmaların yapılması gerekirken öte yandan mevcut durumu ile renkli pamuğun ne gibi alanlarda değerlendirilebileceğini ortaya koyan ürüne yönelik çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- [1]. Kalebek NA. Investigation of mechanical properties of yarns and fabrics produced naturally colored cotton fibers, M.Sc. University of Gaziantep, Textile Engineering Department, Gaziantep, 2003

- [2]. Hua S, Wang S, Yuan X, Shao M, Zhao X, Zhu S, Jiang L. Characterization of Pigmentation and Cellulose Synthesis in Colored Cotton Fibers, *Crop Sci. Soc. of America*, 2007; 47(4): 1540-1546
- [3]. T.C. Gümrük ve Ticaret Bakanlığı Kooperatifçilik Genel Müdürlüğü, Pamuk Raporu, 2019
- [4]. <https://www.textilegence.com/dogal-renkli-pamuk/>, Erişim Tarihi: 14.02.2020
- [5]. Değirmenci Z, Kireççi A, Kaynak H. Doğal renkli pamuktan elde edilen dokuma ve örme kumaşların haslık özelliklerinin araştırılması. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2010; 4(2): 30-42.
- [6]. Dutt Y, Wang XD, Zhu YG, Li YY. Breeding for high yield and fibre quality in coloured cotton. *Plant Breeding*, 2004; 123(2): 145-151
- [7]. Dickerson DK, Lane EF, Rodriguez DF. Naturally colored cotton: Resistance to changes in color and durability when refurbished with selected laundry aids, Fresno: California Agricultural Technology Institute, California State University, 1999; 1-42
- [8]. Gülümser, T. Comparison between naturally colored cotton fabric and white cotton fabric in manner of processes in the dyehouse. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2016; 26(3): 287-294
- [9]. Vreeland JM. The Revival of Colored Cotton. *Scientific American*. New York. 1999; 280(4): 112-119.
- [10]. Dodmani MT. Production and value addition in naturally coloured cotton under contract farming -an economic analysis, University of Agricultural Sciences, Dhanuad, 2006
- [11]. Gong W, Du X, Jia Y, Pan Z. Color Cotton and Its Utilization in China, *Cotton Fiber: Physics, Chemistry and Biology*, Springer, 2018; 117-132
- [12]. Rathinamoorthy R, Parthiban M. Colored cotton: Novel eco-friendly textile material for the future. In Martinez LMT et al (Eds.), *Handbook of ecomaterials*, Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. 2019; 1499-1519
- [13]. Kang SY, Epps HH. Effect of scouring and enzyme treatment on moisture regain percentage of naturally colored cottons, *The Journal of The Textile Institute*, 2009; 100(7), 598-606
- [14]. Yatsu LY, Espelie KE, Kolattukudy PE. Ultrastructural and chemical evidence that the cell wall of green cotton fiber is suberized. *Plant Physiology*, 1983; 73(2): 521-524
- [15]. Schmutz A, Jenny T, Amrhein N, Ryser U. Caffeic Acid and Glycerol are Constituents of the Suberin Layers in Green Cotton Fibres, *Planta*, 1993; 189(3): 453-460.
- [16]. Schmutz A, Jenny T, Ryser U. A caffeoyl-fatty acid-glycerol ester from wax associated with green cotton fibre suberin. *Phytochemistry*, 1994; 36(6): 1343-1346.
- [17]. Hustvedt G, Crews PC. The ultraviolet protection factor of naturally-pigmented cotton. *The Journal of Cotton Science*, 2005; 9(1): 47-55.
- [18]. Halloin JM. Localization and changes in catechin and tannins during development and ripening of cottonseed. *New Phytologist* 1982; 90: 641-657.
- [19]. Parmar MS, & Chakraborty M. Thermal and burning behavior of naturally colored cotton. *Textile Research Journal*, 2001; 71(12): 1099-1102
- [20]. <http://www.ideassonline.org/public/pdf/ColoredCotton-ENG.pdf>
- [21]. Williams B. FoxFibre naturally colored cotton, green and brown (coyote) resistance to changes in color. Ph.D diss. Texas Tech. Univ., Lubbock, TX. 1994
- [22]. Garcia S, Naas IDA. Textile industry can be less pollutant: introducing naturally colored cotton, *International Journal of Production Management and Engineering (Int. J. Prod. Manage. Eng.)*, 2014; 2(2): 85-91
- [23]. Botao H. Views of the Colors of Natural Cotton-colored and Several Question in Production, *Cotton Textile Technology*, 2002; 05
- [24]. Gürel A, Akdemir H, Karadağı HB. (2001). Doğal renkli elyafli pamukların Ege bölgesi koşullarında üretilme olanakları, *Anadolu, J. of AARI*, 2001; 11(1): 56-70
- [25]. VanZandt MJ, Horridge P, Dever JK. Flame resistance and physical characteristics of upholstery-weight naturally colored cotton. *Cloth Text. Res. J.* 1997; 15(4):246-251
- [26]. Richards AF, Rowe, T, Stankovic Elesini U. Structure of naturally coloured cottons. *Journal of the Textile Institute*, 1999; 90(4): 493-499.
- [27]. Price JB, Cui X, Calamari TA. Assessing the Quality of Four Naturally Colored Cottons. *Textile Res. J.* 2001; 71(11): 993-999.
- [28]. Gu H. Research on the improvement of the moisture absorbency of naturally self-coloured cotton. *The Journal of The Textile Institute*, 2005; 96, 247-250.
- [29]. Matusiak M, Kechagia U, Tsaliki E, Frydrych IK. Properties of the naturally colored cotton and its application in the ecological textiles. In 4th World Cotton Research Conference, Lubbock, USA, 2007
- [30]. Üte TB, Oğlakçıoğlu N, Çelik P., Marmaralı A., Kadoğlu H. Doğal Renkli Pamuk ve Angora Tavşanı Lifi Karışımından Üretilen İpliklerin Özellikleri ve Örgü Kumaşların Isıl Konforuna Etkileri Üzerine Bir Araştırma, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 2008; 18(3): 191-197.
- [31]. Chen H, Cluver B. Biodegradation and mildew resistance of naturally colored cottons. *Textile Research Journal*, 2010; 80(20): 2188-2194
- [32]. Chae Y, Lee M, Cho G. Mechanical properties and tactile sensation of naturally colored organic cotton fabrics. *Fibers and Polymers*, 2011; 12(8): 1042-1047.
- [33]. [33] Ma M, Li R, Du Y, Tang Z, Zhou W. Analysis of antibacterial properties of naturally colored cottons. *Textile Research Journal*, 2013; 83(5): 462-470

- [34]. Hinchliffe DJ, Condon B, Delhom CD, Chang S, Montalvo J, Madison C, Reynolds M, VonHoven T, Santiago Cintro'n M. Physical and combustion properties of non-woven fabrics produced from conventional and naturally colored cottons. *Textile Research Journal*, 2015; 85(16):1666–1680
- [35]. Ma M, Luo S, Hu Z, Tang Z, Zhou W. Antioxidant properties of naturally brown-colored cotton fibers. *Textile Research Journal*, 2016; 86(3): 256-263.
- [36]. Nam S, Kim HJ, Condon BD, Hinchliffe DJ, Chang S, McCarty JC. Madison, C. A. High resistance to thermal decomposition in brown cotton is linked to tannins and sodium content. *Cellulose*, 2016; 23(2): 1137–1152.
- [37]. Gunaydin, GK, Palamutcu S, Soydan AS, Yavas A, Avinc O, Demirtas M. Evaluation of fiber, yarn, and woven fabric properties of naturally colored and white Turkish organic cotton. *The Journal of The Textile Institute*, 2019; 111(10): 1436-1453





## Benzetimli Tavlama Algoritması İle Eksik Veri Tamamlama

Serkan METİN\*

Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Sosyal ve Beşeri Bilimler Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya,  
Türkiye  
serkan.metin@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 31/10/2020;

Kabul/Accepted: 27/11/2020)

**Öz:** İstatistiksel birçok yöntem eksik değerlere sahip veri setleri üzerinde çalışma kapasitesine sahip değildir. Bu nedenle, girdi olarak yalnızca tam veriyi kabul eden modellerin tahmin performansı önemli ölçüde düşmektedir. Eksik verilerin tamamlanması bunun için veri analizlerinde önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada kullanılan veri seti üzerinde eksik olan verilerin tamamlanma probleminin çözümünde sezgisel optimizasyon yöntemi olan Benzetimli Tavlama Algoritması(BTA) kullanılmıştır. Modern sezgisel teknikler, bir problem çözümünde, kendi yerel arama sistemleri ile en iyi sonuca ulaşmayı amaçlamaktadırlar. BTA performansını etkileyen en önemli değer başlangıç sıcaklık değeri ( $T_0$ ) olduğundan üç farklı sıcaklık değeri ile sonuçlar alınmıştır.  $T_0=100.000$  değeri için %68,  $T_0=10.000$  için %51 ve  $T_0=1.000$  için %46'lık bir başarı elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Eksik veri, genetik algoritma, benzetimli tavlama algoritması, sezgisel yöntemler

### Completion of Missing Data with the Simulated Annealing Algorithm

**Abstract:** Many statistical methods are not capable of working on datasets with missing values. Therefore, the forecasting performance of models that accept only full data as inputs drops significantly. For this reason, completing missing data has an important place in data analysis. Simulated Annealing Algorithm (SAA), a heuristic optimization method, was used to solve the problem of completing the missing data on the data set used in this study. Modern heuristic techniques aim to achieve the best results with their local search systems when solving a problem. Since the most important value affecting SAA performance is the initial temperature value ( $T_0$ ), results have been obtained with three different temperature values. The following success rates were obtained: 68% for  $T_0=100.000$ , 51% for  $T_0=10.000$  and 46% for  $T_0=1.000$ .

**Key words:** Missing data, genetic algorithm, simulated annealing algorithm, heuristic methods

#### 1. Giriş

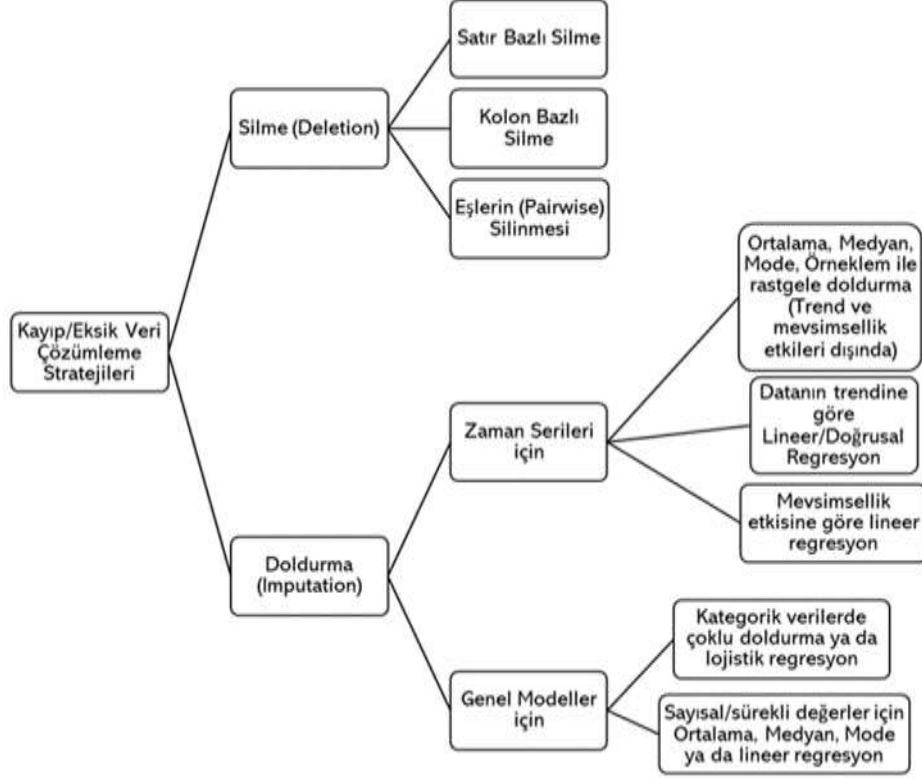
Gözlemsel verileri analiz ederken karşılaşılan en yaygın sorun eksik verilerdir. Gerçek veri kümeleri, çeşitli nedenlerden dolayı eksik verilerden oluşabilir [1]. Endüstri, tıp, ticaret ve bilimsel araştırmalar gibi [2] çok farklı kaynaklardan alınarak oluşturulan veri setlerinde eksik bilgiler ile karşılaşılabilir [3]. Toplanan verilerde tutarsızlıklar, hatalar, aykırı değerler ve eksik değerler gibi çeşitli kusurlar olabilir. Özellikle eksik veri oranı çok yüksek olan veri setlerinde, veri madenciliği veya makine öğrenmesi yöntemleri uygulanırken performans düşerken [4], istatistiksel yöntemlerde ise eksik veriler ile tahmin yapmak oldukça sorunludur [5]. Girdi olarak yalnızca tam veriyi kabul eden algoritmalar eksik bir veri ile test edildiklerinde tahmin sonuçlarında önemli bir hata oluşmaktadır [6]. Bu nedenle, veri kalitesini artırmak için eksik veriler tamamlanmalıdır [7]. Eksik veri terminolojisi ilk kez Little ve Rubin tarafından kullanılmıştır [8]. Eksik değerleri ele almak için iyi bilinen ve hesaplama açısından basit birkaç yaklaşım vardır [1]:

- Eksik kayıtları göz ardı etmek.
- Boş değerleri manuel olarak doldurmak.
- Eksik veriyi ortalama veya medyan değeri ile doldurmak

Eksik değerlere yaklaşımlarda yapılacak ilk adım verinin örüntü varlığını incelemektir [9]. Veri setinde yer alan eksik verilerin belli bir örüntü oluşturmadığı durumlarda farklı çözüm yöntemleri önerilmektedir [10]. Bu yöntemler silme, yaklaşık değer atama [11] ve model tabanlı atama yöntemleri olarak sınıflandırılabilir.

\* Sorumlu yazar: serkan.metin@ozal.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: 0000-0003-1765-7474

Eksik verilerin değerlendirilmesindeki ilk yöntem kayıp veri olan kaydı yok saymaktır. Ancak eksik verinin çok olduğu ya da az kayıta sahip testlerde bu çözüm sonucu yanlış değerlere saptırmaktadır. Bu tür veri setlerinde eksik değer yerine yeni bir değer ataması yapmak çok daha iyi bir yaklaşımdır [12]. Bu gibi veri setlerindeki eksik sütun değerlerini tahmin etmek için hem sezgisel hem de model tabanlı gösterim yöntemleri kullanılır [13]. Eksik veri tamamlama ile ilgili kullanılabilecek yöntemler Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Kayıp/Eksik Veri Çözümleme Stratejileri [14]

## 2. Benzetimli Tavlama Algoritması

Benzetimli Tavlama Algoritması (BTA), metallerin tavlama sürecinden esinlenerek [15] belirli bir maliyet fonksiyonunun küresel optimumuna yaklaşmak için tasarlanmış [16] sezgisel bir optimizasyon tekniğidir [17]. BTA, katıların ısıtılması ve ardından yavaşça soğutulması esasına dayanır [18]. Isıtılan katıların sıcaklığı düştüğünde, katının iç parçacıkları her sıcaklıkta bir denge durumuna ulaşır [19]. BTA, ısı arttıkça, en iyi yerel optimayı bulmak için komşu bölgeye gidecektir. Yavaş yavaş soğumaya başladığında ise en iyi yerel optimada durmaya çalışacaktır [20]. Bu yaklaşım, optimizasyon problemine en çözümü bulmak için kullanılır [21].

BTA, çözümde rastgele değişiklik yapabildiğinden yerel olarak optimal bir çözüme düşme olasılığı az olduğundan [22] geleneksel optimizasyon algoritmalarından daha güvenilir [23] ve problem için daha iyi sonuçlar verir [24]. BTA'nın yerel çözümlerde takılı kalmaması için P kabul olasılığı tanımlanır [25]:

$$P = e^{-\Delta E/T} \quad (1)$$

$\Delta E$  farklı zaman aralıklarında malzemenin enerji değişimini, T ise sıcaklık değerini temsil eder. Başlangıç değeri olan T'nin değeri her yinelemde yavaş yavaş azalacaktır. BTA'nın kurallarına göre birincil çözüm tamamen rastgele oluşmaktadır [26]. Bu neden ile BTA'nın performansı büyük ölçüde başlangıç değerine bağlıdır. Başlangıç değerinin kalitesi zayıfsa, sonuç yetersiz olur [27]. Bu sebeple, aramaya yeteri kadar yüksek bir sıcaklık değeri ile başlamak gereklidir [28].

### 3. Yöntem

#### 3.1. Benzetimli Tavlama Algoritması Yöntemi

Kirkpatrick 1983'de, kombinatoriyal optimizasyon problemini çözmek için ilk kez BTA algoritmasını kullanmıştır [29]. BTA, pek çok farklı alandaki optimizasyon problemlerine kapsamlı bir şekilde uygulanan [30] etkili bir optimizasyon algoritmasıdır [31]. BTA yöntemine ait çözüm adımları [32] :

Adım 1:  $s = S_0$  kriterlere uyan herhangi bir çözüm

Adım 2:  $t = t_0$  başlangıç sıcaklık değeri.

Adım 3:  $\alpha$  sıcaklık düşürme kuralını belirle.

$$t = t - \alpha \quad (2)$$

$$t = t * \alpha \quad (3)$$

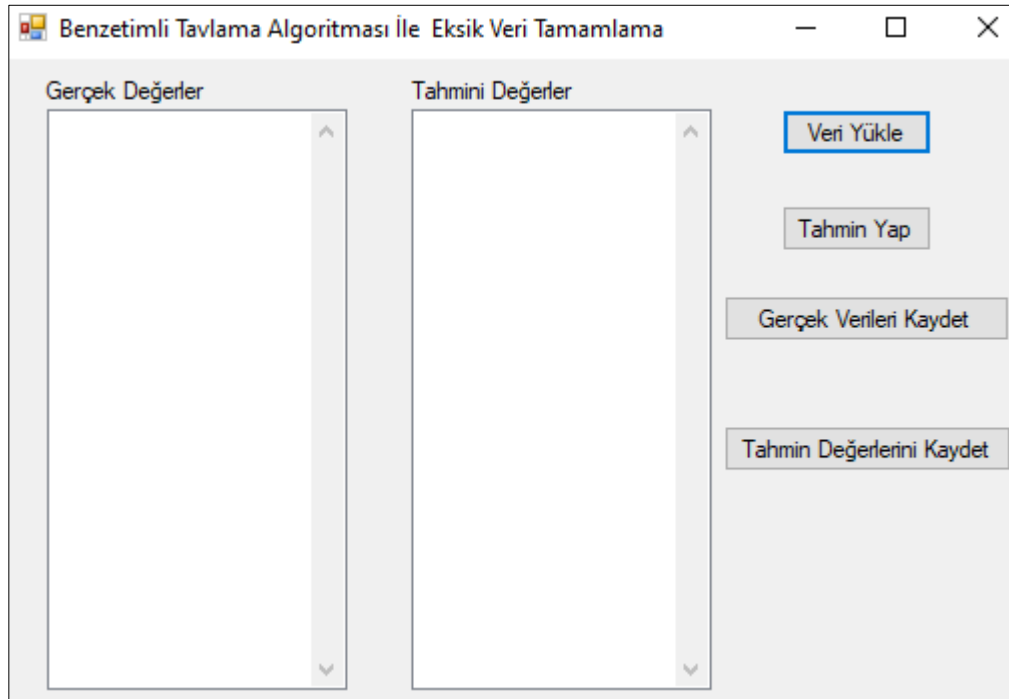
$$t = t / (1 + \beta t) \quad \beta \text{ rastgele bir sayı} \quad (4)$$

Adım 4: İlk sıcaklıktan başlayarak, 5. Adımın n yinelenmesini tekrarlayın ve ardından sıcaklığı  $\alpha$ 'ya göre düşürülür.

Adım 5: N (s) çözümlerinin komşuluğunu göz önünde bulundurarak, çözümlerden birini seçin ve eski çözüm ile yeni komşu çözüm arasındaki maliyet farkı hesaplanır.

Adım 6: Eski ve yeni çözüm arasındaki maliyet farkı 0'dan büyükse yeni çözümü farkı 0'dan düşükse eski çözüm kabul edilir.

Uygulama için Türkiye'ye ait Sağlık Bakanlığı tarafından yayınlanan Covid-19 verileri kullanılmıştır. Veri setinden rastgele olarak değerler silinerek yeni veri seti oluşturulmuştur. Veri seti içerisindeki "Tanı Sayısı" sütununa ait veriler Şekil 2'de verilmiş olan programa ait arayüzde bulunan veri yükle seçeneği ile programa dahil edilmiştir.



Şekil 2. Uygulama arayüzü

BTA ile tahmin işlemi başlatıldığında rastgele silinmiş olan satırdaki bilgiler var olan bilgilerden faydalanılarak tespit edilmiş ve eksik veriler tamamlanmaya çalışılmıştır. Uygulamada kullanılan BTA kod yapısı [33]:

- 1 Başlangıç sıcaklık değeri  $T_0$
- 2 İlk çözümü oluşturun  $s$
- 3 **While** sonlandırma şartlar oluşmazsa

- 4  $v = \text{Komşuseçim}(s)$
- 5  $f = \text{Değerlendirme}(v)$
- 6 If  $f$  tatmin olasılıklı kabul kriteri
- 7  $s = v$
- 8 Tavlama programına göre  $T_0$  güncelle
- 9 Son
- 10 Çıktı  $s$

Eksik veri tamamlamada kullanılan BTA algoritmasının doğru sonuca ulaşmasındaki en büyük etken başlangıç sıcaklık değeridir. Çalışmamızda 3 farklı başlangıç sıcaklık değeri kullanılarak veri seti içerisindeki eksik veriler tamamlanmıştır. İlk örnek setinde başlangıç sıcaklık değeri sırası ile 100.000, 10.000 ve 1.000 olarak belirlenmiştir. Verilen başlangıç değerine göre elde edilen başarı oranları sırası ile %68, %51 ve %46 olarak tespit edilmiştir. Tablo 1’de elde edilen sonuçlara ait değerler Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmiştir.

**Tablo 1.** Başlangıç değeri=100.000 için bulunan değerler

Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler	Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler	Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler
343955	40974	370832	20163	38226	38226
308069	45459	47	47	6	6
349519	36538	170132	170132	186493	186493
15679	15679	52167	52167	190165	190165
155686	155686	158762	158762	20921	20921
169218	169218	185245	185245	314433	48467
222402	32177	23934	23934	366208	23892
355528	32091	301348	42853	120204	120204
1529	1529	138657	138657	209962	32707
7402	7402	135569	135569	117589	117589
244392	33198	127659	127659	82329	82329
112261	112261	10827	10827	306302	43506
42282	42282	284943	43786	98674	98674
182727	182727	95591	95591	90980	90980
126045	126045	281509	43376	86306	86306
361801	27296	164769	164769	191657	191657
114653	114653	174023	174023	261194	40525
176677	176677	324443	46929	195883	195883
197239	197239	237265	33296	156827	156827
5	5	191	191	308069	47167

**Tablo 2.** Başlangıç değeri=10.000 için bulunan değerler

Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler	Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler	Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler
201098	201098	56956	56956	223315	30702
47029	47029	244392	35731	302867	46243
312966	46360	373154	18105	219641	29610
173036	173036	167410	167410	162120	162120

98	98	13531	13531	149435	149435
368513	22123	255723	39016	299810	45579
288126	42132	274943	41402	212993	31282
179831	179831	353426	33648	278228	41696
154500	154500	181298	181298	345678	39386
159797	159797	233851	32973	139771	139771
238450	34133	150593	150593	107773	107773
1236	1236	148067	148067	283270	43570
291162	44515	184031	184031	279806	40508
289635	43708	163103	163103	152587	152587
110130	110130	226100	31904	5698	5698
131744	131744	104912	104912	244392	34501
947	947	334031	51052	327557	51500
193115	193115	224252	30606	267064	41780
178239	178239	69392	69392	2433	2433
218717	32032	320070	43990	30217	30217

**Tablo 3.** Başlangıç değeri=1.000 için bulunan değerler

Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler	Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler	Gerçek Değerler	Tamamlanan Değerler
332382	52642	188897	188897	292878	44735
9217	9217	133721	133721	229891	32208
224252	31958	65111	65111	221500	32105
18	18	168340	168340	163942	163942
175218	175218	225173	30574	166422	166422
122392	122392	144749	144749	194511	194511
227982	30644	302867	44622	18135	18135
3629	3629	251805	36560	311455	46089
236112	31669	253108	36994	253108	35652
74193	74193	240804	32113	265515	41537
199906	199906	227019	31977	239622	34420
146457	146457	214993	32280	215940	30832
230873	32390	1	1	171121	171121
211981	31472	124375	124375	129491	129491
187685	187685	137115	137115	228924	29455
240804	33406	670	670	241997	32406
157814	157814	153548	153548	323014	50459
250542	37489	274943	42700	359	359
1872	1872	248117	36381	271705	42406
265515	38960	223315	32033	288126	44198

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada veri madenciliği, makine öğrenmesi ve istatistiksel yöntemlerde kullanılan veri setleri içerisindeki eksik verilerin sezgisel optimizasyon tekniği olan BTA ile tamamlanması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında literatür incelenerek eksik veri tamamlama yaklaşımları belirlenmiştir. Eksik veri tamamlama yöntemleri kullanılırken var olan verilerden faydalanmak genel bir yaklaşımdır. BTA'nın tercih edilmesinin sebebi algoritmanın yerel optimum noktalarında takılı kalmamasıdır.

BTA incelendiğinde başlangıç değeri başarı oranını doğrudan etkilediğinden uygun bir başlangıç değerinin seçilmesi gerekmektedir. Algoritma bir optimizasyon yöntemi olduğu için uygulanacak olan veri setindeki eksik verilerin neden kaynaklandığı belirlenmelidir. Eksik veriye ait örüntü çıkarıldıktan sonra yöntem uygulanmalıdır.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında en yüksek olarak %68'lik bir başarı yakalanmıştır. Başarı oranını artırabilmek için optimum başlangıç değerini ayarlayabilecek yöntemler geliştirilebilirse eksik veri tamamlama konusunda önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. BTA algoritmasının dezavantajı ise soğuma işleminin uzun sürmesidir.

#### Kaynaklar

- [1]. Sefidian A.M, Daneshpour N. Estimating missing data using novel correlation maximization based methods, *Applied Soft Computing Journal*, 2020; 91: 106249.
- [2]. Rahman M.G, Islam M.Z. Missing value imputation using a fuzzy clustering-based EM approach, *Knowl. Inf. Syst.* 2016; 46 (2): 389–422.
- [3]. Gopalakrishnan R, Guevara C.A, Akiva M. Combining multiple imputation and control function methods to deal with missing data and endogeneity in discrete-choice models, *Transportation Research Part B*, 2020; 142: 45–57.
- [4]. Ye C, Wang H, Li J, Gao H, Cheng S. Crowdsourcing-Enhanced missing values imputation based on Bayesian network, in: *International Conference on Database Systems for Advanced Applications*, Springer; 2016: 67–81.
- [5]. Mercaldo S.F, Blume J.D. Missing data and prediction: the pattern submodel, *Biostatistics*, 2020; 21(2): 236–252.
- [6]. Zhiyong C, Longfei L, Ziyuan P. Yin Hai Wang Graph Markov network for traffic forecasting with missing data, *Transportation Research Part C*; 2020.
- [7]. Qin Y, Zhang S, Zhu X, Zhang J, Zhang C. POP algorithm: Kernel-based imputation to treat missing values in knowledge discovery from databases, *Expert Syst. Appl.*, 2009; 36 (2): 2794–2804.
- [8]. Molenberghs G, Thijs, H, Jansen I, Beunckens, C, Kenward, M.G, Mallinckrodt, C, Carroll, R.J. *Analyzing Incomplete Longitudinal Clinical Trial Data*; 2004.
- [9]. Sayın A, Yandı A, Oyar E. Kayıp Veri ile Baş Etme Yöntemlerinin Madde Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi, *Journal of Measurement and Evaluation in Education and Psychology*, 2017; 8(4): 490-510.
- [10]. Carpita M, Manisera M. On the imputation of missing data in surveys with Likert-type scales. *Journal of Classification*, 2011; 28(1): 93-112.
- [11]. Demir E, Parlak B. Türkiye’de eğitim araştırmalarında kayıp veri sorunu. *Eğitimde ve Psikolojide Ölçme ve Değerlendirme Dergisi*, 2012; 3(1): 230-241.
- [12]. Sezgin E, Çelik Y. Veri Madenciliğinde Kayıp Veriler İçin Kullanılan Yöntemlerin Karşılaştırılması, *Akademik Bilişim Konferansı, Akdeniz Üniversitesi*, 2013.
- [13]. Little, R.J.A. , Rubin, D.B. *Statistical Analysis with Missing Data: Second Edition*. John Wiley and Sons, 2002
- [14]. Şener Y. Veri Biliminde Eksik/Kayıp Verilere Yaklaşım Stratejileri ve Python (Pandas) Uygulaması, 2020
- [15]. Min L, Yue C, Xiaojing S, Zhishan Z, Xiaoxiao Z, Xiuyu Z, Jun G. Simulated annealing-based optimal design of energy efficient ternary extractive dividing wall distillation process for separating benzeneisopropanol-water mixtures, , *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020.
- [16]. Xiangzhen Z, Sanjiang L, Yuan F. Quantum Circuit Transformation Based on Simulated Annealing and Heuristic Search, , *Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2020.
- [17]. Moriguchi K. Acceleration and enhancement of reliability of simulated annealing for optimizing thinning schedule of a forest stand, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020.
- [18]. Kirkpatrick S, Gelatt C.D, Vecchi, M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Science new series*, 1983; 220(4598): 671–680.
- [19]. Songsheng T, Minjun P, Genglei X, Ge W, Cheng Z. Optimization design for supercritical carbon dioxide compressor based on simulated annealing algorithm, *Annals of Nuclear Energy*, 2020.
- [20]. Asrul S.R, Ikram M, Mohd R. Mohd A.A. Energy Management Strategy of HEV based on Simulated Annealing, *Int. J. of Integrated Engineering*, 2020; 12(2): 30-37.
- [21]. Lizhong Z, He M, Wei Q, Haiyan L. Protein structure optimization using improved simulated annealing algorithm on a three-dimensional AB off-lattice model, *Computational Biology and Chemistry*, 2020.
- [22]. Jin C, Bin W. Flocking Control of Mobile Robots via Simulated Annealing Algorithm, *Proceedings of the 39th Chinese Control Conference*, 2020; 3931- 3935.
- [23]. Tatsuya K, Hideharu K, Hiroyuki N, Tatsuhiro T. Using simulated annealing for locating array construction, *Information and Software Technology* 126, 2020.

- [24].Attiya I, Elaziz M, Xiong S. Job Scheduling in Cloud Computing Using a Modified Harris Hawks Optimization and Simulated Annealing Algorithm, *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2020.
- [25].Hanine M, Benlahmar E H.A Load-Balancing Approach Using an Improved Simulated Annealing Algorithm, *J Inf Process Syst*, 2020;16:132-144.
- [26].Jafari H, Ehsanifar M, Sheykhan A. Finding Optimum Facility's Layout by Developed Simulated Annealing Algorithm, *Int. J. Res. Ind. Eng.*, 2020; 9(2): 172–182.
- [27].İlhan İ. A population based simulated annealing algorithm for capacitated vehicle routing problem, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 2020; 28: 1217–1235.
- [28].Cayıroglu I. İleri Algoritma Analizi, 2020.
- [29].Xianze M, Yunpeng F, Junsheng Y. Estimating solubilities of ternary water-salt systems using simulated annealing algorithm based generalized regression neural network, *Fluid Phase Equilibria*, 2020.
- [30].Cunha M, Marques J. A New Multiobjective Simulated Annealing Algorithm—MOSA-GR: Application to the Optimal Design of Water Distribution Networks, *Water Resources Research*, 2019.
- [31].Minghao G, Chunbo W, Baicheng L, Bin S. Yuanshen Huang Design and implementation of a Placido disk-based corneal topographer optical system based on aberration theory and simulated annealing algorithm, *Optics Communications* 475, 2020.
- [32].Liang F. Optimization Techniques Simulated Annealing A popular method for optimizing model parameters, 2020.
- [33].Tsai C.W, Hsia CH, Yang SJ, Liu SJ, Fang ZY. Optimizing hyperparameters of deep learning in predicting bus passengers based on simulated annealing, *Applied Soft Computing Journal* 88, 2020.





## Soğuk Şartlar Altındaki Bir Boruda MHD Nanoakışkanın Zorlanmış Taşınım ile Isı Transferi

Murat ERDEM<sup>\*1</sup>, Yasin VAROL<sup>2</sup>, Müjdat FIRAT<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> muratrdm01@gmail.com, <sup>2</sup> yvarol@gmail.com, <sup>3</sup> mujdatfirat@gmail.com

(Geliş/Received: 26/12/2020;

Kabul/Accepted: 01/02/2021)

**Öz:** Mevcut çalışmada manyetik alan etkisi altındaki bir boruda  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının ısı transferi olgusu sayısal olarak incelenmiştir. Dış manyetik alan akışkan yönüne dik olarak uygulanmıştır. Yönetici denklemler ANSYS Fluent ticari yazılım programı ile çözülmüştür. Akışkan sıcaklığı ( $T_i$ ) boru sıcaklığından ( $T_w$ ) daha yüksek tutularak akışkanın soğuması sağlanmıştır. Reynolds sayısı ( $Re$ ), Hartmann sayısı ( $Ha$ ) ve nanoartikül hacimsel oranı ( $\phi$ ) sırasıyla,  $Re=10, 100, 500, 1000, 2000$ ,  $Ha=0, 25, 50, 100$  ve  $\phi=0.01, 0.03, 0.05$  olarak seçilmiştir. Çalışmada, yerel Nusselt ( $Nu_x$ ) ve ortalama Nusselt ( $Nu$ ) sayısı detaylı olarak incelenmiştir.  $Re=10$  hariç diğer  $Re$  sayılarında manyetik alan uygulanması ve nanopartikül eklenmesi hem yerel hem de ortalama  $Nu$  sayısını artırmıştır. Sabit  $Ha$  sayısı ve  $\phi$  değerinde  $Re$  sayısının artmasıyla ısı transferi artmıştır. Sonuç olarak  $Re$  sayısı,  $Ha$  sayısı ve nanopartikül hacimsel oranıyla ısı transferinin arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Manyetohidro dinamik, Nanoakışkan, Zorlanmış taşınım, Isı transferi.

### Heat Transfer with Forced Convection of MHD Nanofluid in a Pipe Under Cold Conditions

**Abstract:** In the present study, the heat transfer phenomena of  $Al_2O_3$ -water nanofluid in a pipe under the magnetic field effect have been investigated numerically. The external magnetic field is applied perpendicular to the fluid direction. Government equations are solved with ANSYS Fluent commercial software programmer. The fluid temperature ( $T_i$ ) was kept higher than the pipe temperature ( $T_w$ ), allowing the fluid to cool. Hartmann number ( $Ha$ ), Reynolds number ( $Re$ ) and nanoparticle volume fractions ( $\phi$ ) have been selected as  $Re=10, 100, 500, 1000, 2000$ ,  $Ha=0, 25, 50, 100$  and  $\phi=0.01, 0.03, 0.05$ , respectively. In the study, Local Nusselt ( $Nu_x$ ) and average Nusselt number ( $Nu$ ) have been examined in detail. Except  $Re = 10$ , applying a magnetic field and adding nanoparticles in the other  $Re$  numbers have been increased both local and average  $Nu$  number. The heat transfer has raised with the increase  $Re$  numbers in the fixed  $Ha$  number and  $\phi$ . As a result, it has been determined that the heat transfer increases with  $Re$  number,  $Ha$  number, and nanoparticles volume fraction.

**Key words:** Magnetohydrodynamics, Nanofluid, Forced convection, Heat transfer.

### 1. Giriş

Nanopartiküllerin ısı transferine olan etkisinin daha iyi anlaşılması için yapılan birçok bilimsel çalışma mevcuttur. Elektriksel iletkenliği olan akışkanların manyetik alan ile ısı transferini değiştirme tekniği literatürde son zamanlarda sıkça çalışılan öncü konulardan bir tanesidir. Nanoakışkan, nano boyuttaki parçacıkların temel akışkan içerisindeki süspansiyonudur. Bununla alakalı nanoakışkan terimi ilk kez Choi [1] tarafından kullanılmıştır. Konuyla alakalı bazı araştırmacılar düşük nanopartikül konsantrasyonlarında termal iletkenliğin yaklaşık % 20'ye kadar çıkabileceğini kanıtlamışlardır [1-4]. Diğer bir uygulama alanı olan Manyetohidro dinamik (MHD), manyetik alan altında elektriksel iletkenliğe sahip olan sıvıların davranışını inceleyen disiplinler arası bir araştırma konudur. MHD ile ilgili ilk çalışma Hartmann ( $Ha$ ) tarafından yapılmıştır [5]. Hartmann, manyetik alana maruz iki paralel plaka arasında elektrik iletkenliğe sahip viskoz ve sıkıştırılmaz bir sıvının davranışını araştırmıştır. Bir dairesel kanal içindeki zorlanmış taşınım ile ısı transferi olayı da, güneş kolektörleri, enerji santralleri, yüksek performanslı kazanlar, soğutma-ısıtma sistemleri, kimyasal katalitik reaktörler ve diğer birçok akış hareketi ile ısı transferi uygulamaları gibi birçok teknolojik uygulamaların en önemli konularından biridir [6-10]. Literatürde, farklı nanopartikül tipi, nanopartikül hacimsel oranı, değişik geometri ve sınır şartları ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazılarını aşağıda verilmiştir. Erdem ve Varol [11], Cu-su nanoakışkanına dış manyetik alan uygulayarak akış karakteristikleri ve ısı transferini incelemişlerdir. Çalışmada özellikle yüksek  $Re$  sayılarında, manyetik alan ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla ısı transferinde iyileşme meydana

\* Sorumlu yazar: [muratrdm01@gmail.com](mailto:muratrdm01@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-0287-1881, <sup>2</sup> 0000-003-2989-7125, <sup>3</sup> 0000-0001-6978-9044

geldiğini ortaya koymuşlardır. Erdem [12] değişik nanoakışkan tipleriyle yaptığı çalışmada manyetik alanın ısı transferini arttırmada çok etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca Erdem vd. [13], bir boruda lityum sıvısı için, Erdem ve Varol [14] sıvı PbLi17 üzerinde yaptıkları sayısal çalışmada manyetik alanın akışkanın ısı transferini arttırdığını belirlemişlerdir. Öztürk [15], sabit ısı akısına maruz iki paralel plaka arasından, elektriksel iletkenliği olan bir viskoz akışkanın daimi, tam gelişmiş laminer ve bu akışa dik manyetik alanın varlığında ısı transferini analitik olarak incelemiştir. Knudsen sayısı ( $Kn$ ), Brinkman sayısı ( $Br$ ) ve Hartmann sayısının hız, sıcaklık dağılımı ve ısı transferi karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Ha sayısının artmasıyla  $Nu$  sayısının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca, Knudsen sayısı arttıkça, kanal duvarındaki sıcaklık atlamalarından dolayı  $Nu$  sayısının azaldığını tespit etmiştir.

Lu vd. [16], laminer ve türbülanslı akışlar için bir silindirik elektromanyetik akış ölçerin üç boyutlu MHD ile ilgili bazı simülasyonlarını ANSYS-FLUENT MHD modülünü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Her iki akış türü için elektrik alan, akım yoğunluğu ve bağlantı kablosu elektrotları boyunca elektrik potansiyeli verilerini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, elektrotlar üzerinde hesaplanan elektrik potansiyeli farkının küçük Ha sayısı durumları için analitik değerlerle uyumlu olduğu, ayrıca, türbülanslı akışın karşıt-kesitli akış ölçerindeki elektrik potansiyeli dağılımının laminer akışından daha üniform olduğunu savunmuşlardır. Sun vd. [17], iletkenliği olan bir akışkan içerisinde, belirli bir mesafede kendileri de iletken olan iki parçacığın çok güçlü bir manyetik alan altında, parçacıklar arası etkileşim ile katı-sıvı etkileşimini incelemek için nümerik bir model geliştirmişlerdir. Modeli sonlu hacim metoduna dayanan ticari paket programı ANSYS-FLUENT ile oluşturmuşlardır. Tek bir küresel parçacığın sürüklenme kuvvetinin sürüklenen bir akış sınırında yaklaşık %15 kadar artabileceği ve indüklenen manyetohidrodinamik etkileşim kuvvetinin akış alanı ve manyetik akı yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğunu savunmuşlardır. Nayak vd. [18], sıcaklığa bağlı viskozite ile tel kaplama analizi için üçüncü derece bir sıvının ısı transferi ve sürekli MHD akışı nümerik ve analitik olarak çalışmışlardır. Manyetik alan uygulanmaksızın büyük  $Br$  sayılarının sıcaklık dağılımını artırdığı, sabit viskozite durumunda artan manyetik alanın akışkan hızını azalttığını açıklamışlardır. Reynolds modelinde ise, akışkanın newtonsal olmayan özelliği sıcaklığa bağlı değişebilen viskozite ile birlikte hızı arttırmak için uygun bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Muthuraj ve Srinivas [19], içinde gözenekli madde bulunan asimetrik dalgalı bir kanalda, MHD titreşimli akışın hareketini analitik olarak incelemiştir. Akış hızının radyasyon parametresi, Grashof ( $Gr$ ) ve Pecklet ( $Pe$ ) sayısındaki artışla artarken, Ha sayısının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir. Anwar Bég vd. [20] tarafından, Darcian ( $Da$ ) gözenekli bir ortama sahip iki paralel plaka arasında viskoz, sıkıştırılmaz manyetohidrodinamik bir akış için nümerik bir çözüm geliştirilmiştir.  $Da$  değeri ve basınç gradyanının artmasıyla hem birincil hem de ikincil hız alanının arttığı, fakat bu alanların Ha sayısının artmasıyla azaldığını gözlemlenmişlerdir. Bandyopadhyay ve Layek [21], dar bir kanalda manyetohidrodinamik akışı hem sürekli hem de vürcümlü akış için sonlu fark metodunu kullanarak zamana bağlı nümerik olarak çözmüşlerdir. Akış ayrılma bölgesinin manyetik parametrenin artmasıyla azaldığını, vürcümlü akıştaki duvar kayma gerilmesi tepe değerinin zamanla değiştiği ve bu değer maksimum akış hızında en büyük değeri aldığını, her iki akış şartlarında (sürekli ve vürcümlü) manyetik parametrenin sınır tabaka ayrışmasının uygulanan dış manyetik alan ile kontrol edilebileceğini rapor etmişlerdir. Huang ve Li [22], üstü açık dikdörtgen bir kanalda, kanallın altına yarı küresel çıkıntılı duvarlar (protrusion walls) yerleştirerek ısı transfer artırımını ( $Nu/Nu_0$ ), akış karakteristikleri, sürtünme kayıplarını ( $f/f_0$ ) ve termal performans sayısal olarak incelemiştir. Manyetik alan yoğunluğu  $30 \leq Ha \leq 70$  arasında seçmişlerdir. Çıkıntılı ısı transfer katsayısını artırdığı ve Ha sayısının artmasının bu katsayının azalttığını elde ettikleri sonuçlarla ortaya koymuşlardır. Aminfar vd. [23], dikey bir halkada, manyetiklenme özelliğine sahip ferroakış zorlanmış taşınım kritik ısı akısı üzerindeki manyetik alanın etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneyde temel akışkan olarak su, nanopartikül olarak  $Fe_3O_4$  kullanılmıştır.

Benzer şekilde doğal taşınım üzerinde Kefayati [24], bir dış manyetik kaynak varlığında lineer olarak ısıtılmış bir oyukta ferroakışkan doğal taşınım ısı dağılımının etkisini Lattice Boltzmann Methodu (LBM) yardımıyla nümerik olarak çalışmıştır. Çalışma sıvısı olarak gazyağı ve nano ölçekli kobalt parçacıklarının eklenmesiyle oluşan koloit karışımını oluşturmuştur. Sonuçlar, çeşitli Rayleigh ( $Ra$ ) sayıları için ferromanyetik parçacıkların artması ısı transferini azalttığını göstermiştir. Sheikholeslami ve Ganji [25], sinüzoidal sıcak duvar ile yarı halka bir oyukta manyetik nanoakışkan ve ısı transferi üzerinde, dıştan uygulanan manyetik alanın etkisini nümerik olarak incelemiştir.  $Nu$  sayısının,  $Ra$  sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının artmasıyla arttığı ve Ha sayısının artmasıyla azaldığı vurgulanmıştır. Yazarlar ayrıca, düşük  $Ra$  sayısı için ısı transferi artırımının, Ha sayısının artan bir fonksiyonu olduğunu ortaya koymuşlardır. Malvandi vd. [26], dikey bir halka boruda  $Al_2O_3$ -su ile dolu nanoakışkanın MHD karma taşınım üzerinde nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Borunun iki tarafına ısı akısı uygulanmıştır. Nanopartikül göçünün etkisini hesaplamak için Brownian hareket yöntemi kullanılmıştır. Isı transferi artırımında bir avantaj olarak görülen nanoakışkanın, manyetik alan varlığında ısı

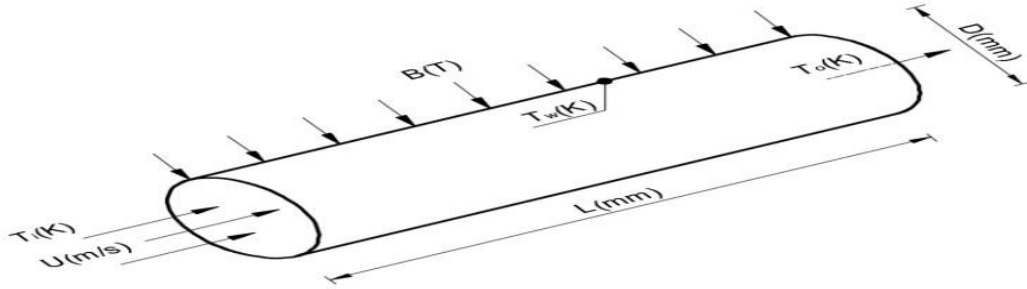
transferini azaltan bir parametre olduğu, fakat temel akışta  $Ha$  sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığı ortaya konulmuştur.

Nanoakışkana manyetik alan uygulanması ile ısı transferi ve akış karakteristiklerinin incelenmesi günümüzde literatürde çok çalışılan konulardandır. Dünya nüfusunun artması ile enerji kaynaklarının tükenmesi insanoğlunu sürekli yeni ısı transferi tekniklerini araştırmaya sevk etmektedir. Bunlardan bir tanesi de nanopartikül eklenmesi ve manyetik alan şiddeti ile akışkanın kontrol edilerek ısı transferini iyileştirilmesi tekniğidir. Bu amaçla mevcut çalışmada, manyetik alana maruz bırakılan bir boruda  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanı ısı transferi açısından incelenmiştir. Bunun için  $Re$  sayısı,  $Ha$  sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının etkisi detaylı olarak incelenmiş ve her bir parametrenin etkisi ayrı bir Şekil içerisinde gösterilerek hangi parametrenin daha baskın olduğunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Böylece, etkili olan parametre daha net olarak belirlenmiştir. Nanoakışkanın manyetik alan kuvveti ile kontrol edilebilmesinde ve yüksek  $Re$  sayılarında ısı transferini artırmada çok etkili bir yöntem olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

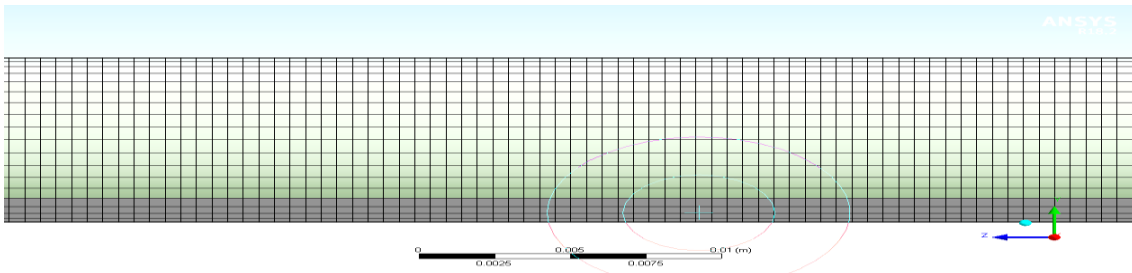
### 2.1. Problem Tanımlanması ve Ağ Yapısı

Bu çalışmayı analiz etmek için üç boyutlu dairesel bir kanal kullanılmıştır. Kullanılan boru modeli Şekil 1’de gösterilmiştir. Boru çapı 10,92 mm’ye karşılık gelen, boru kalınlığı 0.89mm standart 1/2" plastik boru kullanılmış ve malzeme özellikleri programda buna göre tayin edilmiştir. Akışkan giriş ve duvar sıcaklıkları sırasıyla  $T_i=50$  ve  $T_w=30^\circ C$  olarak seçilmiştir.



Şekil 1. Üç boyutlu dairesel kanal modeli ( $T_i$ : Akışkan giriş sıcaklığı,  $U=V$ : Akışkan giriş hızı,  $B$ : Manyetik alan şiddeti,  $T_w$ : Cidar sıcaklığı,  $T_o$ : Çevre sıcaklığı,  $L$ : Boru uzunluğu,  $D$ : boru çapı)

Boru ANSYS-FLUENT’te beş katı parçaya bölünerek oluşturulmuştur. Borunun ortasına kare-karşıt kesitli bir geometri ile ayrılarak borunun bölünmesi sağlanmıştır. Bu şekilde ağ yapısı çok daha kaliteli olmaktadır. Bu ağ yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ağ yapısında herhangi bir sapma (yamuk, yan, birbirini kesme vb.) yoktur. Literatürde bunun programdaki zorluklarından dolayı ağ yapısı genelde tek parça olarak oluşturulmaktadır. Ancak bu yöntem bölünmüş ağ yapısı kadar verimli değildir. Bu yüzden geometrinin bölünerek oluşturulması önerilmektedir. Bununla ilgili daha kapsamlı bilgiler Erdem [12] tarafından ispatlanmıştır. Çalışmada kullanılan ağ yapısının düğüm sayısı ve hücre sayısı sırasıyla 202669 ve 194000’dir. Mesh Orthogonal (dörtgensel) ve Skewness (sapma) değerleri de sırasıyla 0. 0.97116 ve 8.8444e-002’dir. Orthogonal kalitesi 1 değerine yaklaştıkça mesh kalitesi de aynı oranda artmaktadır. Bu veriler literatüre göre oldukça iyi olduğu düşünülebilir. Burada geometrinin bölünerek yapılmasının etkisi oldukça büyüktür.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan ağ yapısı

## 2.2. Sayısal Hesaplamalar

ANSYS-FLUENT ticari yazılım programının içinde mevcut olan MHD modülü ile bu sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Denklemler sonlu hacim tekniği ile çözülmüştür. Basınç-hız çifti için daha uygun olduğu düşünülen SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Boru içerisindeki akışkan, Newtonyen, sıkıştırılmaz ve laminar olarak kabul edilmiştir. Nanopartiküller küresel-şekilli boyut olarak çok küçük olduğundan nanoakışkan tek bir faz gibi davranmaktadır. Bu yüzden hesaplamalar tek fazlı akışkan olarak gerçekleştirilmiştir.

Boyutlu Navier-Stokes denklemleri Eş. 1-3 ile belirlenmektedir [27,28]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \nabla P + \nu_{nf} \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{\rho_{nf}} \vec{F} \quad (2)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{T} = \alpha_{nf} \nabla^2 \vec{T} \quad (3)$$

$\vec{F}$ , Lorentz kuvvetinden kaynaklanan kaldırma ve cisim kuvveti Eş. 4 ile ifade edilir [27, 29].

$$\vec{F} = \vec{g}_y (\sigma\beta)_{nf} (\vec{T} - T_0) + \vec{J} \times \vec{B} \quad (4)$$

Eş. 4 'teki son terim Lorentz kuvveti olarak tanımlanmakta ve sıvı hareketine neden olmaktadır.

$\vec{J}$ , elektrik akım yoğunluğu Ohm yasası ile bulunmuştur:

$$\vec{J} = \rho_{nf} (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (5)$$

$\vec{E}$ , DC elektrik akımıdır ve  $\vec{B}$ , z yönündeki manyetik alandır. Böylece, manyetik alan ve elektrik akımı birbirine diktir ve bu da x ve y yönlerinde Lorentz kuvvetine neden olmaktadır. Baz akışkan ve nanopartiküllerin termodinamik özellikleri Kaynak [12]'den alınmıştır.  $T_i=50^\circ\text{C}$  referans giriş sıcaklığında nanoakışkanın termodinamik özellikleri aşağıdaki formüller yardımıyla hesaplanır.

Nanoakışkanın yoğunluğu Eş. 6 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (6)$$

Nanoakışkanın özgül ısı kapasitesi Eş. 7 ile bulunur.

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_s \quad (7)$$

Nanoakışkanın termal iletkenliği ( $k_{nf}$ ) takip edilen Eş. 8, Maxwell-Garnett's (MG modeli) ile hesaplanır.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (8)$$

Eş. 9 ve Eş. 10, sırasıyla nanoakışkanın dinamik viskozitesini (Brinkman modeli) ve Ha sayısını hesaplamak için kullanılır ( $\nu_f$ -akışkanın kinematik viskozitesi).

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (9)$$

$$Ha = BR \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f}} \quad (10)$$

Yerel Nusselt sayısı, sıcak duvarın kenarındaki ısı dengesinden (Eş. 11) elde edilmektedir [1].

$$Nu_x = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{(\partial T / \partial n)L}{(T_w - T_i)} \quad (11)$$

Ortalama Nusselt sayısı (Nu), yerel Nusselt sayılarının kanal uzunluğu (L) boyunca entegre edilerek hesaplanır (Eş. 12).

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (12)$$

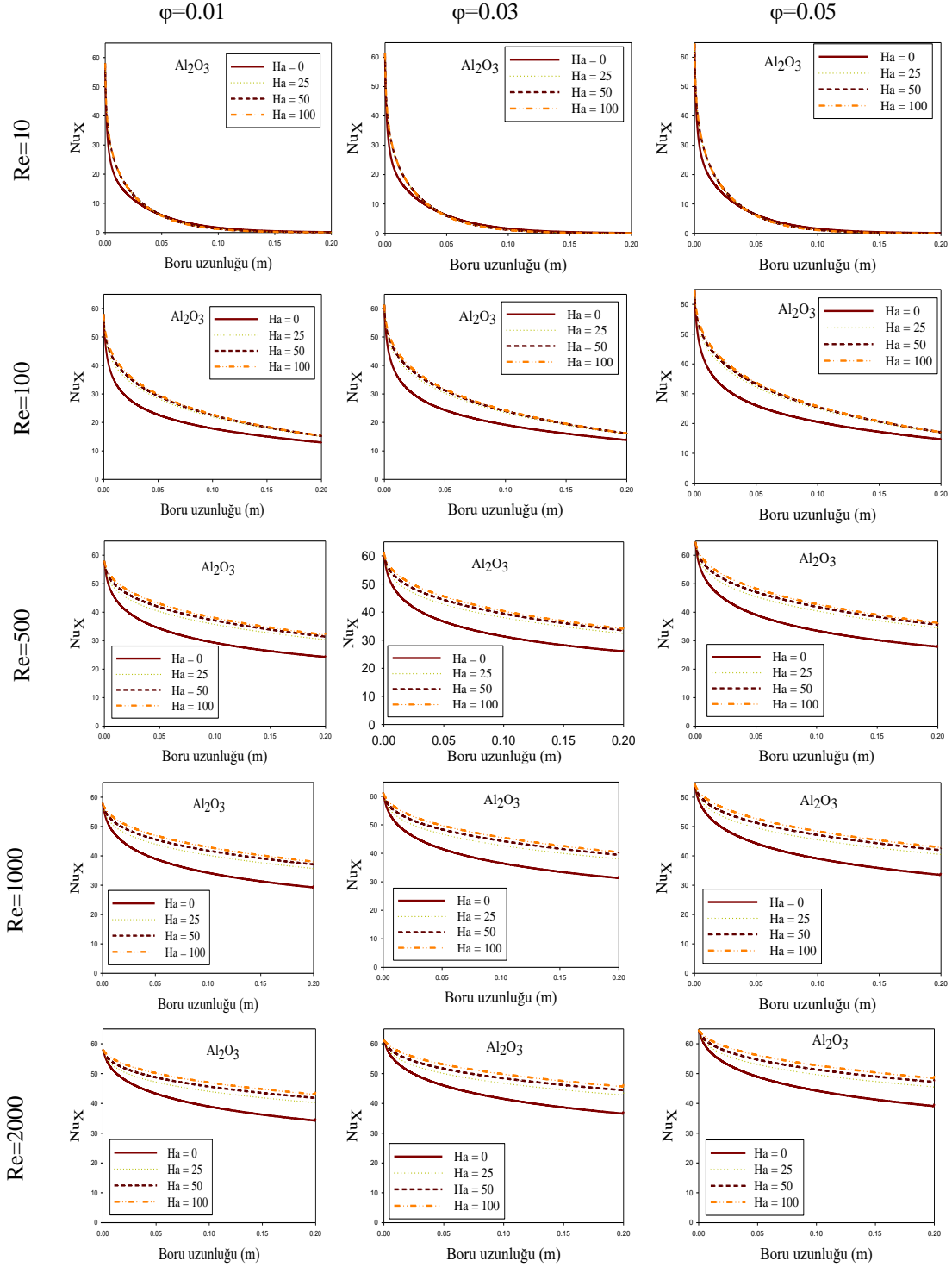
### 3. Sonuçlar ve Tartışma

Sıcak akışkanla duvar arasındaki sıcaklıktan hesaplanan yerel Nu değerlerinin boru uzunluğu boyunca değişimleri çalışma kapsamında irdelenmiştir. Detaylı olarak incelenen çalışmadan Re sayısı, Ha sayısı ve nanopartikül hacimsel oranının Nu değerlerini önemli oranda iyileştirdiği anlaşılmıştır. Kapsamlı sonuçlar grafik olarak sunulmuştur.

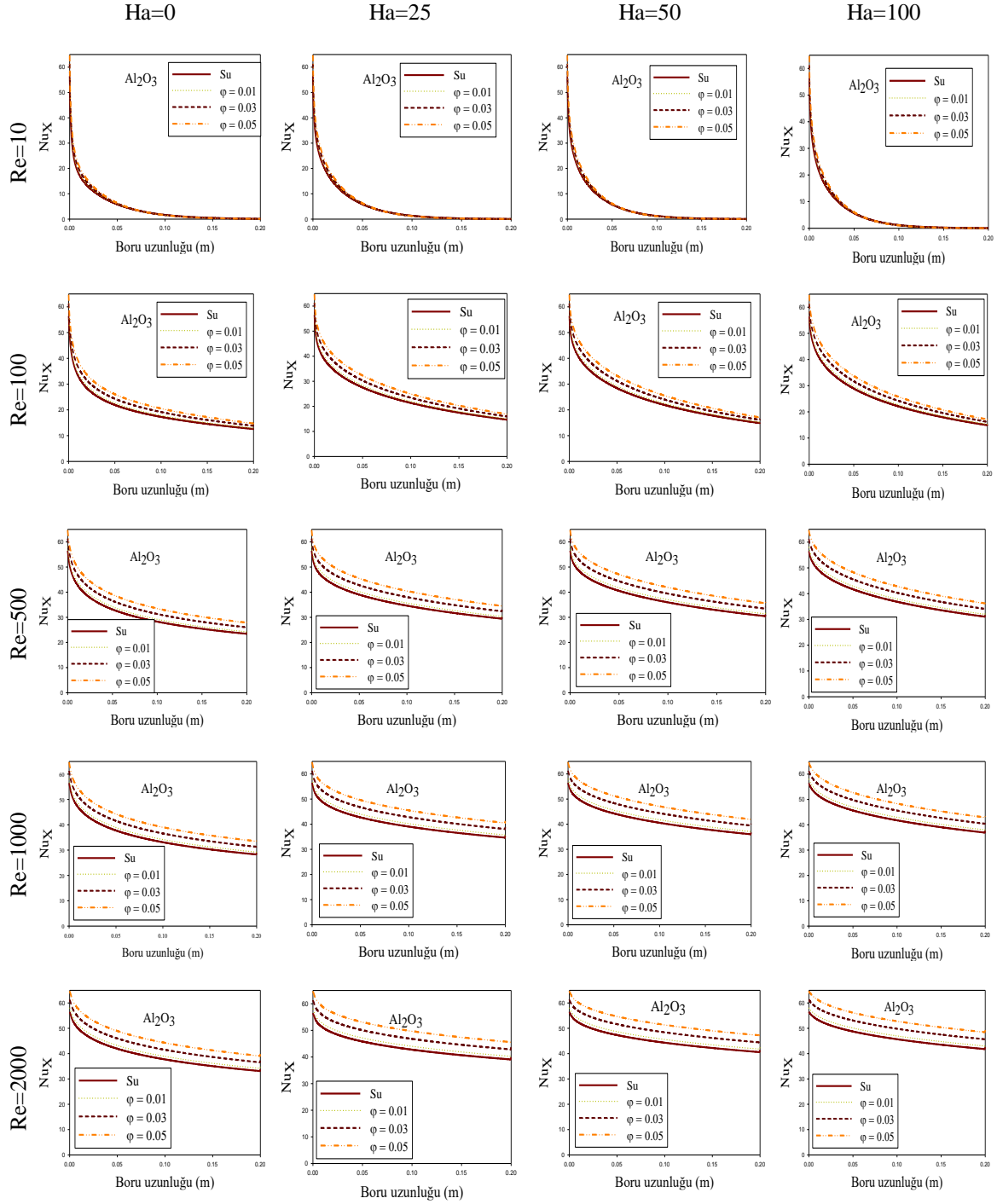
Farklı nanopartikül hacimsel oranlarındaki  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanına ait yerel Nu sayılarının boru uzunluğu boyunca Ha sayısı değişimleri Şekil 3'te verilmiştir. En düşük Re sayısına sahip akışkan için kanalın yaklaşık 0.04m mesafesine kadar yerel Nu sayısının, manyetik alan kuvvetinin etkisi ile saf akışkana göre önce arttığı ve bu noktadan sonra değerlerin azaldığı tespit edilmiştir. Bu değerler Ha=25 için  $Nu_x=5.845$ , Ha=50 için  $Nu_x=6.231$ , Ha=100 için  $Nu_x=6.750$  değerinden sonra azalarak saf akışkandan daha az değerler almaya başlamıştır (Re=10- $\phi=0.01$ ). Re=10 ve  $\phi=0.03$  parametresi için, sırasıyla Ha=25, 50 ve 100 değerlerinde  $Nu_x$  sayıları sırasıyla  $Nu_x=6.280$ , 6.832 ve 7.436 değerinden sonra saf akışkana göre azalmaya başlamıştır. Aynı şekilde Re=10 ve  $\phi=0.05$  için, sırasıyla Ha=25, 50 ve 100 için yerel Nu değerleri,  $Nu_x=6.799$ , 7.426, 7.973 değerlerine ulaştıktan sonra saf akışkana göre azalma eğilimine geçmiştir. Bu değişim, çalışma kapsamında elde edilen en önemli sonuçlardan bir tanesidir. Bu durumun nedeni, akışkan hızının oldukça düşük olması ve manyetik alan kuvveti ile akışkan hızının daha da azalmasından kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle taşınım olayının belirli bir noktadan sonra çok az gerçekleşmesi olarak da açıklanabilir. Burada doğal taşınım olayına benzer bir sonuç ortaya çıkmıştır. İletim taşınımından daha baskın olmuştur. Ayrıca Re = 10 parametresinde manyetik alanın ısı transferini arttırdığı, ancak manyetik alan kuvvetlerinin birbirlerine göre neredeyse hiç ısı transferini değiştirmediği tespit edilmiştir. Re=100'de manyetik alan şiddetinin yerel Nu sayısını artırdığı ve kanalın sonuna doğru aşağı-yukarı birbirine eşitlendiği görülmektedir. Diğer üç Re sayısında (500, 1000, 2000) Ha sayısının artmasıyla birlikte yerel Nu sayılarında artış olduğu daha net olarak anlaşılmış ve kanalın girişinden çıkışına kadar bu artış düzenli olarak devam etmiştir. Re sayısının artmasıyla orantılı olarak meydana gelen yerel Nu sayısı değişimi daha fazla olmuştur. Kanalın tam girişindeki yerel Nu sayılarının değerleri, nanopartikülün eklenmesinin ısı transferini iyileştirdiğini kanıtlamaktadır.

Nanopartikül eklenmesi ile akışkan üzerinde meydana gelen ısı transferi olayını daha net anlamak için, Şekil 4'te  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının farklı nanopartikül hacimsel oranlarında yerel Nu sayılarının karşılaştırılmaları gösterilmiştir. Manyetik alan şiddetinin olmadığı (Ha=0) ve olduğu (Ha=25, 50 ve 100) durum ile beş farklı Re sayısı (Re=10, 100, 500, 1000, 2000) için sonuçlar gözlemlenmiştir. Şekil incelendiğinde nanopartiküllerin ısı transferi üzerinde çok etkili olduğu net şekilde görülmüştür. Nanopartikül hacimsel oranın yüksek değerlerinde yerel Nu sayısı daha fazla çıkmıştır. Diğer grafiklerin tümünde kanal boyunca nanopartiküllerin katkısıyla ısı transferinin iyileştiği belirlenmiştir. Yerel Nu ile ilgili daha önceki sonuçlarda açıklandığı gibi bu durumun akışkanın çok yavaş hareket etmesi ile akışkan taşınımının çok az meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yani iletimle olan ısı transferi mekanizmasının taşınım ile olan ısı transferine göre daha baskın olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

Şekil 5'de  $Al_2O_3$ -su nanoakışkanının üzerinde farklı Ha sayıları ve nanopartikül hacimsel oranlarında Re sayısı etkisi sunulmuştur. Ortaya çıkan sonuçlar beklenildiği gibi Re sayısının ısı transferini arttırmada çok etkili olduğu belirlenmiştir. Çalışılan bütün parametrelerde Re sayısının artmasıyla daha fazla akışkan taşındığından ısı transferi çok ciddi bir oranda artmıştır.

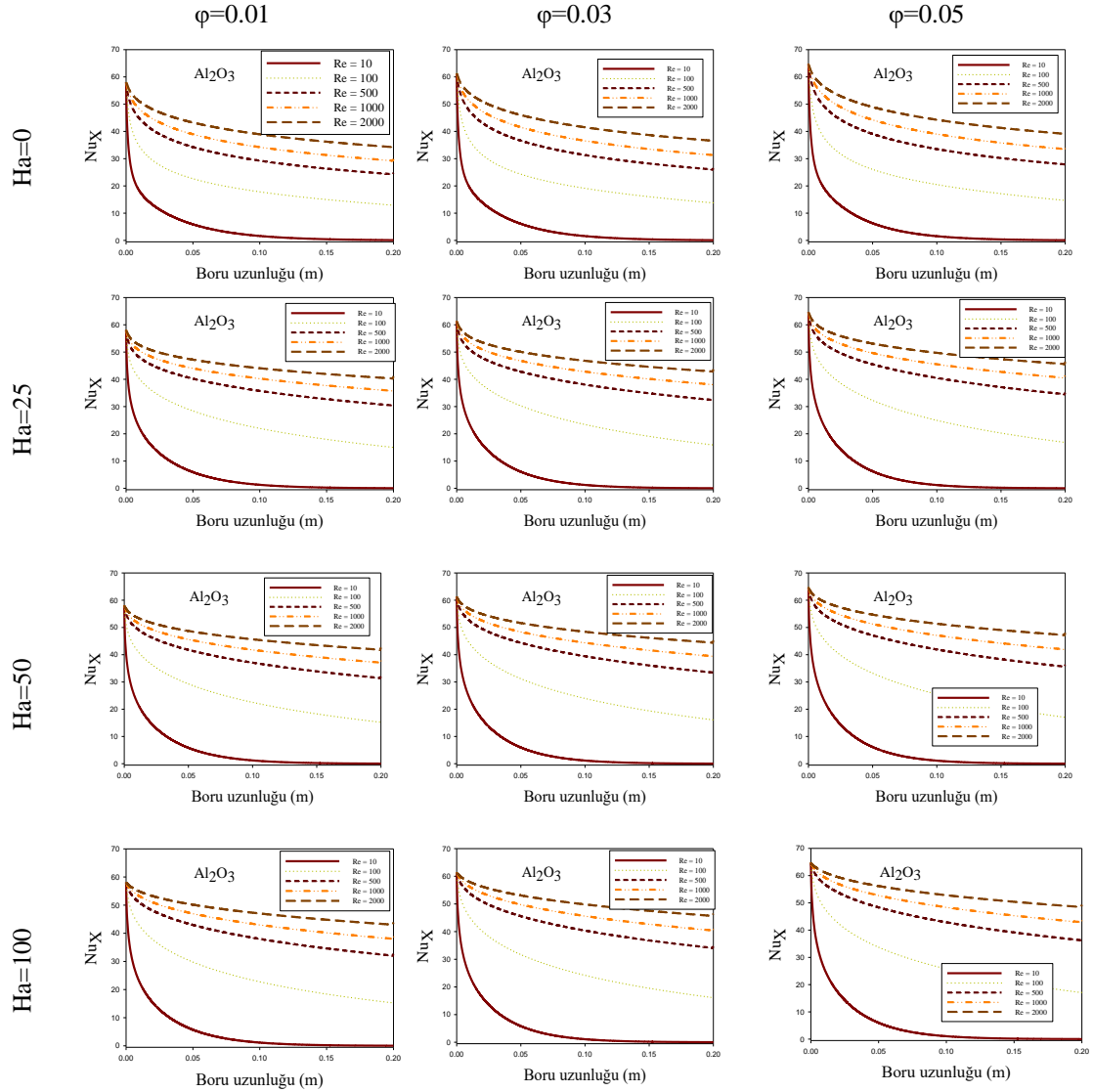


Şekil 3.  $Al_2O_3$  – su nanoakışkanının boru uzunluğu boyunca yerel Nu sayısının Ha sayısı ile değişimi



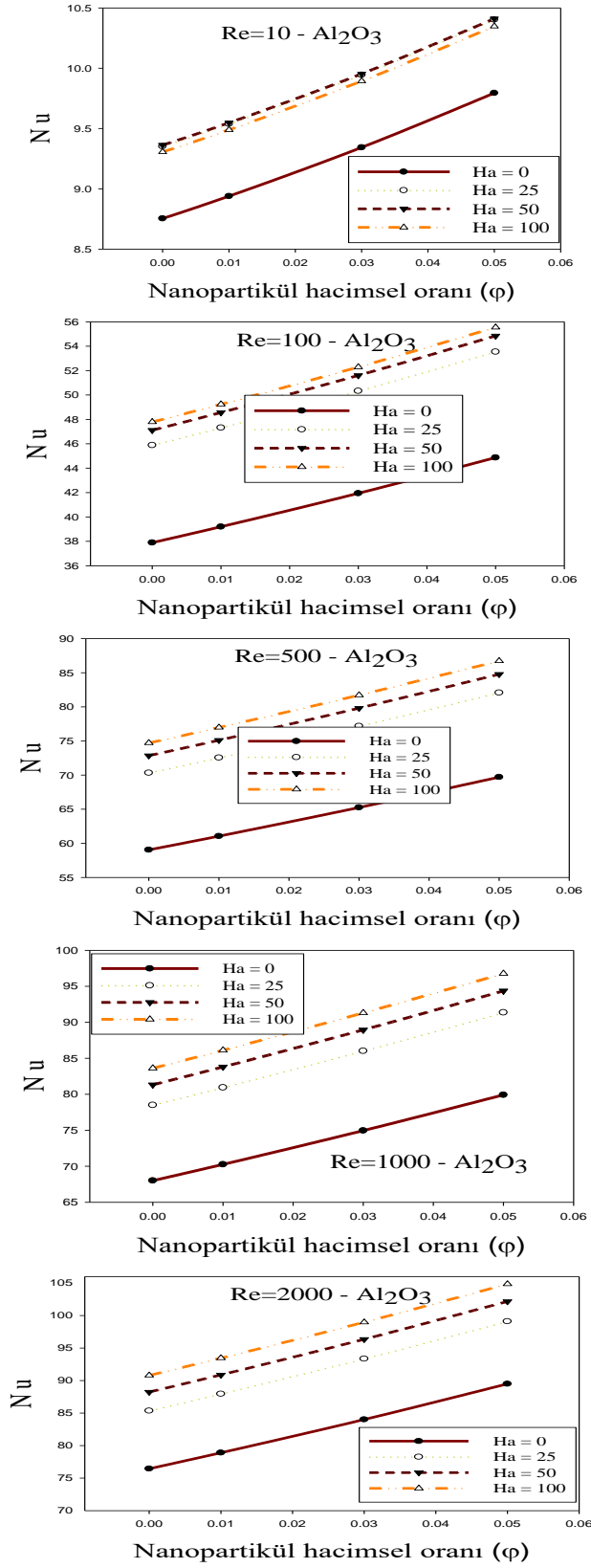
Şekil 4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – su nanoakışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının nanopartikülle değişimi





Şekil 5.  $Al_2O_3$  – su nanoakışkanının kanal boyunca yerel Nu sayılarının Re sayısı ile değişimi

Elde edilen ortalama Nu değerlerinin nanopartikül hacimsel oranıyla değişimi farklı Re ve Ha değerleri için Şekil 6’da verilmiştir. Re=10 hariç bütün çalışma parametrelerinde Ha sayısı, Re sayısı ve nanopartikül hacimsel oranı ortalama Nu sayısı üzerinde arttırıcı bir etki meydana getirmiştir. Ancak Re=10’da manyetik alan ilk uygulandığında önce ısı transferi artmış, daha sonra artma yavaş şekilde devam etmiş, fakat Ha=100’de ısı transferi azalmıştır. Bunda daha önce bahsedilen akışkanın çok yavaş hareket etmesi durumu etkili olmuştur. Yerel Nu sayılarında da ısı transferinin kanalın yaklaşık  $\frac{1}{4}$ ’ünden sonra azalma eğilimi gösterdiği ve toplamda iletim değerlerinin taşınım değerlerinden daha fazla olduğu belirtilmişti. En düşük ortalama Nu sayısı, su ( $\phi=0$ ), Re=10 ve Ha=0 için Nu=8.753 iken, en yüksek değer  $\phi=0.05$ , Re=2000 ve Ha=100 için Nu=104.843 olarak elde edilmiştir. Burada düşük Re sayısından sonra elde edilen diğer sonuçlar Heidary vd. [6] ile Erdem ve Varol [11] tarafından, ortalama Nu sayısı, nanopartikül hacimsel oranı ve Ha sayısı arasındaki ilişkiyi incelerken gerçekleştirdikleri sayısal sonuçlarla oldukça uyumlu bir eğilim göstermiştir.



Şekil 6. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-su nanoakışkanının ortalama Nu sayısı üzerinde  $\phi$ , Re ve Ha etkisi

#### 4. Sonuç

$Al_2O_3$ -su nanoakışkanı için ısı transferi olayı, manyetik alana maruz olan bir boruda sayısal olarak incelenmiştir. Farklı Re, Ha ve nanopartikül hacimsel oranlarının etkisini görmek için elde edilen sonuçlar, bu parametrelerin ısı transferi üzerinde çok etkili olduğunu göstermektedir. Beklenildiği gibi Re sayısı ile hem yerel hem de ortalama Nusselt sayısı artmıştır. Re=100, 500, 1000 ve 2000 için, manyetik alan ve nanopartikül eklenmesi ile birlikte yerel ve ortalama Nu sayısı artmıştır. Re=10 için manyetik alan ve nanopartikül hacimsel oranının artması ile birlikte yerel Nu sayılarında hem azalma hem de artma meydana gelmiştir, bu durum (azalma) akışkanın çok az hareket ettiğinden kaynaklanmaktadır. Ancak, Re=10 şartında ortalama Nu sayısı nanopartikül ile artarken, Ha sayısının 50'den 100'e geçerken azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durumda çalışma kapsamında elde edilen önemli sonuçlardan bir tanesidir. Nanoakışkanların etkisini daha iyi anlamak için farklı geometrilerde, farklı sınır şartlarında hem deneysel hem de sayısal çalışmalar gerçekleştirilerek daha önemli sonuçların elde edilmesi önerilmektedir.

#### Teşekkür

Bu sayısal çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje biriminin (FUBAP) katkılarıyla gerçekleştirilmiştir (Proje No: TEKF.15.01). Yazarlar bu projeye desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesine teşekkür ederler.

#### Kaynaklar

- [1] Choi SUS, Eastman JA. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. No. ANL/MSD/CP-84938, CONF-951135—29, Argonne National Lab., IL, 1995.
- [2] Lee S, Choi SUS, Li S, Eastman JA. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nano-particles ASME J Heat Transfer 1999; 121: 280-289.
- [3] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nano fluids containing copper nano-particles. App Phys Lett 2001; 78: 718-720.
- [4] Xuan Y, Li Q. Heat transfer enhancement of nano-fluids. Int J Heat Fluid Flow 2000; 21: 58-64.
- [5] Hartmann J. Theory of the laminar flow of an electrically conductive liquid in a homogeneous magnetic field, Mathematisk Fysiske Meddelelser. 1937; 15(6): 1-28.
- [6] Heidary H, Hosseini R, Pirmohammadi M, Kermani MJ. Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel. J magn magn Mater 2015; 374: 11-17.
- [7] Wang BX, Du JH, Peng XF. Internal natural, forced and mixed convection in fluid-saturated porous medium. Trans Phenom Porous Media 1998; 357-382.
- [8] Demirel Y, Al-Ali HH, Abu-Al-Saud BA. Enhancement of convection heat-transfer in a rectangular duct. Appl Energy 1999; 64: 441-451.
- [9] Cheng KC, Hong SW. Effect of tube inclination on laminar convection in uniformly heated tubes for flat-plate solar collectors. Sol Energy 1972; 13: 363-371.
- [10] Esfe MH, Saedodin S, Malekshah EH, Babaie A. Mixed convection inside lid-driven cavities filled with nanofluids. J Therm Anal Calorim 2019; 135: 813-859.
- [11] Erdem M, Varol Y. Numerical investigation of heat transfer and flow characteristics of MHD nano-fluid forced convection in a pipe. J Therm Anal Calorim 2020; 139(6): 3897–3909.
- [12] Erdem M. Nano parçacık katkılı manyetohidrokinamik akışın deneysel ve sayısal incelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [13] Erdem M, Fırat M, Varol Y. Dairesel bir kanalda soğutma şartları altında MHD sıvı lityum akışın sayısal olarak incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2018; 24(1): 30-35.
- [14] Erdem M, Varol Y. Numerical investigation of PbLi17 fluid flow forced convection heating under magnetic field. Journal of Materials and Electronic Devices 2019; 1(1): 41-45.
- [15] Öztürk A. MHD slip flow between parallel plates heated with a constant heat flux. J Thermal Science Technol 2013; 33(1): 11-20.
- [16] Lu B, Xu L, Zhang X. Three-dimensional MHD simulations of the electromagnetic flowmeter for laminar and turbulent flows. Flow Measur Instrument 2013; 33: 239-243.
- [17] Sun ZHI, Zhang X, Guo M, Pandelaers L, Vleugels J, Van der Biest O, Van Reusel K, Blanpian B. Strong magnetic field effects on solid-liquid and particle-particle interactions during the processing of a conducting liquid containing non-conducting particles. J Colloid Interface Sci 2012; 375: 203-212.
- [18] Nayak MK, Dash GC, Singh LP. Steady MHD flow and heat transfer of a third grade fluid in wire coating analysis with temperature dependent viscosity. Int J Heat Mass Transfer 2014; 79: 741-754.
- [19] Muthuraj R, Srinivas S. A note on heat transfer to MHD oscillatory flow in an asymmetric wavy channel. Int Commun Heat Mass Transfer 2010; 37: 1255-1260.

- [20] Anwar Bég O, Sim L, Zueco J, Bhargava R. Numerical study of magnetohydrodynamic viscous plasma flow in rotating porous media with Hall currents and inclined magnetic field influence. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 2010; 15: 345-359.
- [21] Bandyopadhyay S, Layek GC. Study of magnetohydrodynamic pulsatile flow in a constricted channel. *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 2012; 17: 2434-2446.
- [22] Huang H, Li B. Heat transfer enhancement of free surface MHD-flow by a protrusion Wall. *Fusion Engineer Design* 2010; 85(7-9): 1496-1502.
- [23] Aminfar H, Mohammadpourfard M, Maroofiazar R. Experimental study on the effect of magnetic field on critical heat flux of ferrofluid flow boiling in a vertical annulus. *Experiment Thermal Fluid Sci* 2014; 58: 156-169.
- [24] Kefayati GHR. Natural convection of ferrofluid in a linearly heated cavity utilizing LBM. *J Molecul Liquids* 2014; 191: 1-9.
- [25] Sheikholeslami M, Ganji DD. Ferrohydrodynamic and magnetohydrodynamic effects on ferrofluid flow and convective heat transfer. *Energy* 2014; 75: 400-410.
- [26] Malvandi A, Safaei MR, Kaffash MH, Ganji DD. MHD mixed convection in a vertical annulus filled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid considering nanoparticle migration, *J Magn Magn Mater* 2015; 382: 296-306.
- [27] Yousofvand R, Derakhshan S, Ghasemi K, Siavashi M. MHD transverse mixed convection and entropy generation study of electromagnetic pump including a nanofluid using 3D LBM simulation. *Int J Mech Sci* 2017; 133: 73-90.
- [28] Bejan A. *Convection heat transfer*. John Wiley & Sons, New York, A.B.D., 1995.
- [29] Zhao G, Jian Y, Chang L, Buren M. Magnetohydrodynamic flow of generalized Maxwell fluids in a rectangular micropump under an AC electric field. *J Magn Magn Mater* 2015; 387: 111-117.



## Döndürerek Kaplama Yöntemi ile Hazırlanan Ca katkılı TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Optik ve Morfolojik Özellikleri

Uğur ÇALIGÜLÜ<sup>1</sup>, Ayhan ORHAN<sup>1</sup>, Zafer BARLAS<sup>2</sup>, Nida DARCAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 23000, ELAZIĞ

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 54187, SAKARYA

\*<sup>1</sup>ucaligulu@firat.edu.tr, <sup>1</sup>ayorhan@firat.edu.tr, <sup>2</sup>barlas@sakarya.edu.tr, <sup>1</sup>n.darcand@gmail.com

(Geliş/Received: 28/12/2020;

Kabul/Accepted: 29/01/2021)

**Öz:** Bu çalışmada, TiO<sub>2</sub> esaslı ince filmler %1, %3, %5 ve %10 Ca eklenerek hazırlanmış ve numuneler sol jel döndürerek kaplama yöntemiyle üretilmiştir. Numuneler üretilirken, 1000 rpm'lik bir dönme hızı ve 30 saniyelik bir dönme süresi kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi 3 kez tekrarlanmıştır. Üretilen filmlerin UV-VIS spektroskopisi ile geçirgenlik, soğurma ve yansımaya grafikleri çizilmiş ve optik bant aralığı hesaplanmıştır. En düşük yasak enerji aralığına sahip numunenin katkısız TiO<sub>2</sub> (3.59 eV) olduğu görülmüştür. Numunelerin yasak enerji aralığı %1, 3, 5 ve 10 oranlarında Ca katkısı için sırasıyla 3.68, 3.76, 3.74 ve 3.77 olarak hesaplanmıştır. Numunelere ait geçirgenlik grafikleri incelenmiş ve geçirgenlik değerlerinin %70 ile %90 arasında olduğu tespit edilmiştir. Soğurma grafiği incelendiğinde ise numunelerin yüksek şeffaflığa sahip olmasından dolayı görünür bölgedeki ortalama soğurmanın yaklaşık %0,75 ile %4,5 aralığında olduğu görülmüştür. Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) kullanılarak üretilen filmlerin iki boyutlu ve üç boyutlu görüntüleri analiz edilmiştir. AFM analizleri incelendiğinde nano boyutta tanelerin olduğu görülmüştür. Sol-jel yöntemiyle üretilen ince filmlerin yüzey özellikleri, yansımaya, geçirgenlik ve soğurma eğrileri incelenmiş ve yapılan bu incelemeler sonunda, ince filmlerin Ca katkı oranına bağlı olarak yüzey morfolojisinin ve optik özelliklerinin değiştiği tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Nanomalzemeler, İnce Film, Sol Jel-Döndürerek Kaplama, TiO<sub>2</sub>, Ca.

### Optical and Morphological Properties of Ca Doped TiO<sub>2</sub> Thin Films Prepared by Spin Coating Method

**Abstract:** In this study, TiO<sub>2</sub> based thin films were prepared by adding 1%, 3%, 5% and 10% Ca and samples were produced by sol gel spin coating method. While the samples were being produced, coating was carried out using a rotation speed of 1000 rpm and a rotation time of 30 seconds. The coating process was repeated 3 times. Transmittance, absorption and reflection graphs of films were drawn by UV-VIS spectroscopy and optical band gap was calculated. The sample with the lowest forbidden energy range was found to have undoped TiO<sub>2</sub> (3.59 eV). The forbidden energy range of the samples was calculated as 3.68, 3.76, 3.74 and 3.77 for Ca contribution at 1, 3, 5 and 10%, respectively. The permeability graphs of the samples were examined and it was determined that the permeability values were between 70% and 90%. When the absorption graph was examined, it was seen that the average absorption in the visible region was in the range of approximately 0.75% to 4.5% due to the high transparency of the samples. Two-dimensional and three-dimensional images of films produced using Atomic Force Microscope (AFM) were analyzed. When the AFM analyzes were examined, it was seen that there were nano-sized grains. Surface properties, reflection, permeability and absorption curves of thin films produced by sol-gel method were examined and at the end of these investigations, it was determined that the surface morphology and optical properties of thin films changed depending on the Ca additive ratio.

**Key words:** Nanomaterials, Thin Film, Sol Gel-Spin Coating, TiO<sub>2</sub>, Ca.

#### 1. Giriş

Günümüzün en yeni ve en popüler teknolojilerinden biri olan nanoteknoloji kendini fizik, kimya, tıp, genetik, elektronik, metalurji ve malzeme bilimi gibi birçok alanda göstermektedir. Metalurji ve malzeme mühendisliği alanında ise kendini, yeni ve üstün özelliklere sahip nano boyutta metal, metal oksit, seramik, polimer ve kompozit malzemelerin üretimi, karakterizasyonu ve süreç tasarımı şeklinde göstermektedir. Nanoteknoloji ile ve su

\* Sorumlu yazar: ucaligulu@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> ORCID0000-0003-4862-7219, <sup>2</sup>ORCID0000-0002-7648-2566, <sup>3</sup>ORCID0000-0003-3341-259X, <sup>4</sup>ORCID 0000-0002-7648-2566.

geçirmeyen, leke tutmayan, daha hafif ve daha üstün özellikli malzemeler üretilmektedir ve her alanda öne çıkan nanomalzemeler çalışmalarımıza başlarken ilham kaynağı olmuştur.

Titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>), mor ötesi ışık (UV) ile uyarıldığında yüksek oksidasyonu, yüksek verimliliği ve nispeten maliyetin düşük olması gibi avantajları sebebiyle optik ve morfolojik uygulamalar için en uygun yarı iletkenlerdir. TiO<sub>2</sub> ince filmler tozlara göre sahip oldukları avantajları sebebiyle tozlar ile üretilen malzemelerin önüne geçmektedir [1]. Pratik uygulamalar için TiO<sub>2</sub>'in fotoaktivitesinin geliştirilmesi gerekmektedir. Fotoaktiviteyi arttırmak için kullanılan yöntemlerden bir tanesi TiO<sub>2</sub>'in geçiş metalleri veya soy metaller ile katkılandırılmasıdır [2]. Bu özelliklerinden dolayı elektronik devre elemanı ve termokromik devre elemanı olarak elektronik devrelerde, güneş pillerinde ve optik devrelerde yansıma önleyici kaplamalar (antireflective-AR), koruyucu kaplamalar, gaz sensörlerinde farklı optiksel özelliklere sahip filmler olarak uygulama ve araştırmalarda yer almaktadır. Yüksek bir dielektrik sabite sahip olmasından dolayı alan etkili transistor (MISFET) uygulamaları için de iyi bir adaydır [3].

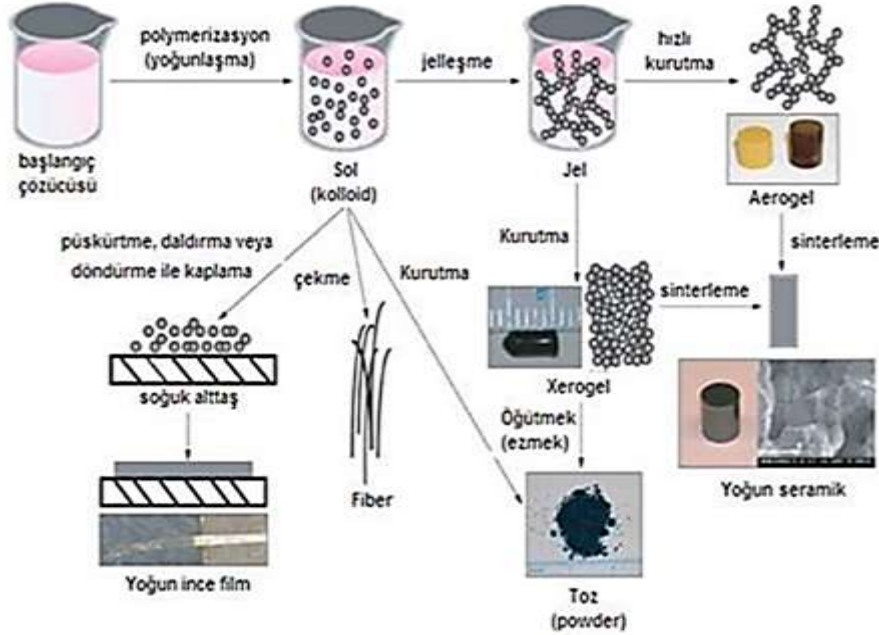
Günümüzde ince film kaplama yöntemi olarak kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme, kimyasal banyo, elektrokimyasal yöntem ve sol-jel yöntemi gibi birçok yöntem ortaya çıkmıştır. Ekonomik, kolay ve hızlı üretilebilmesi, üretilen filmlerin homojen dağılım göstermesi, hızlı olması, çok katlı uygulamalar için uygun olması, parametrelerinin kontrol edilebilmesi ve endüstriyel amaçlarla üretimin uygulanabilirliği gibi etmenler göz önünde bulundurulduğunda, döndürerek kaplama yönteminin uygun bir yöntem olduğu söylenebilir. Nitekim TiO<sub>2</sub> ince film üretme sürecinde verimli bir yöntem olup birçok araştırmacı tarafından yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [4]. Dilek Şura Özden Dinç (2018) yaptığı çalışmada; Mikro uzunlukta, nano boyutta yarıçapa sahip titanyum nanoçubuklar, buhar fazında eğik açı biriktirme yöntemi ile silisyum levha üzerine sabit parametrelerle, homojen bir boy dağılımı gösterecek şekilde biriktirilerek üretilmiştir. Yüzey morfolojisini belirleyen en temel parametre buhar biriktirme açısı olarak tespit etmiştir. 5° buhar birikim açısı değerinde, eğik nanoçubuk yapılar belli bir yönde yönelmiş (anizotropik) olarak elde etmiş ve yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliği bakımından bu açı ile biriktirilme yapılmasına karar vermiştir [5]. Semih Çulhaoğlu (2015) yaptığı çalışmada; sol jel yöntemi ile B ve N katkılandırılmış ince filmler üreterek fotokatalitik aktivitesini incelemiştir [1]. Nida Katı (2019) çalışmasında, sol jel yöntemi ile ince filmler hazırlayarak bu filmlerin optik ve morfolojik özelliklerini incelemiştir [6]. Mustafa İlhan (2019) yaptığı çalışmada; CdO katkılı TiO<sub>2</sub> ince filmleri sol jel döndürerek kaplama yöntemi ile üretilmiştir. Cd içerikli Ti<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub>Cd<sub>x</sub>O numunesinin nanoboyutta tanelerin olduğu ve CdO'nun katkı oranı arttıkça daha yüksek yüzey pürüzsüzlüğüne sahip olduğunu göstermiştir. TiO<sub>2</sub> yüzeyine katılan CdO'nun kısmen TiO<sub>2</sub> oyuklarını kapladığını göstermiştir. Enerji dağılım X-ışınları spektrometre (EDX) incelenmiş ve başka herhangi bir yapıya rastlanmadığı ve üretilen filmlerin atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [7]. M. Streckova (2018) vd yaptıkları çalışmada; Ti substrat üzerinde biyo uyumlu kaplamalar olarak kalsiyum fosfat (CP) ve magnezyum kalsiyum fosfat (MgCP) liflerinin hazırlanması için iğnesiz döndürerek kaplama yöntemini kullanmışlardır. Ti alt taşlarının kalsine edilmesinin, büyüyen rutil mikropartiküllerin morfolojisini küreselden iğneye benzer bir morfolojiye önemli ölçüde değiştirdiğini keşfetmişlerdir [8]. Limny Esther Perez-Jimenez vd (2019) yaptıkları çalışmada, platin nanopartikülleri içeren titanyum oksit filmlerinin optoelektronik özelliklerinin geliştirilmesini incelemiştir [9]. Mojtaba Biglar (2017) vd yaptıkları çalışmada; baryum titanat mikroyapısını incelemiştir. Çok katmanlı aktüatörün etkin özelliklerini belirlemede, malzemenin yanı sıra arabirimin pozisyonunun da önemli bir rol oynadığı bulmuşlardır [10]. Monika Singh (2017) vd yaptıkları çalışmada; perovskit baryum titanat ince filminin sentezi ve karakterizasyonu ve LPG sensörü olarak uygulanmasını incelemiştir [11]. Nisha D. Patel (2016) vd yaptıkları çalışmada; nanokompozit baryum stronsiyum titanatın yapısal ve elektriksel özelliklerini incelemiştir [12]. K.V. Divya Lakshmi (2018) vd yaptıkları çalışmada; Sol-jel yöntemi ile sentezlenen gözenekli Mn ve S ortak katkılı TiO<sub>2</sub> nano materyalin fotokatalitik ve antibakteriyel aktivitesini incelemiştir [13].

Yapılan çalışmada; kalsiyum (Ca) katkılı titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) ince filmler, sol jel döndürerek kaplama metodu kullanılarak üretilmiştir. Hazırlanan Ca katkılı TiO<sub>2</sub> ince filmlerin, Ca katkı oranının bağlı olarak morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Farklı oranlarda katkı yaparak TiO<sub>2</sub>'nin mikroyapı parametrelerinin kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır.

## 2. Malzeme ve Metot

Bu çalışmada saf kaplama elde edilmesi, süreçlerin kolayca kontrol edilebilmesi gibi birçok avantajından dolayı sol-jel tekniği kullanıldı. Homojen çözeltiler hazırlanarak cam altlıklar üzerine eş şartlar ile kaplandı. Saf titanyum dioksit çözeltisi içerisine katılan farklı molar oranlarındaki Ca çözeltilerinin üretilen filmlerin morfolojik özelliklerini hangi ölçüde değiştirdiği araştırıldı. Ca katkılandırılmış TiO<sub>2</sub> esaslı ince filmler bu çalışmada başarılı bir şekilde sentezlenmiş ve döndürerek kaplama tekniği ile cam altlıkların yüzeyinde homojen

bir fiber ağı tabakası oluşturulmuştur. Katkı oranındaki artışa bağlı olarak TiO<sub>2</sub> mikroyapı parametreleri kontrol edilebileceği düşünüldü. Bu sebeple mikroyapı özelliklerindeki değişimlerin farklı hacimlerde yapılan katkılama işleminin bir sonucu olduğu kabul edildi (Şekil 1).



Şekil 1. İnce Filmlere Ait Sol-Jel Kaplama İşlem Aşamaları [14].

Farklı molarlarda kalsiyum katkılanan titanyum dioksit çözeltileri sol-jel tekniği ile hazırlandı. Döndürerek kaplama yöntemi ile jeller cam altlıkların üzerine damlatılarak kaplandı. Titanium (IV) isopropoxide (C<sub>12</sub>H<sub>28</sub>O<sub>4</sub>Ti) ve etil alkol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) sıvı maddeleri başlangıç malzemesi olarak kullanıldı. Katkı maddesi Kalsiyum Nitrat-Tetrahidrat (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O), stabilizör olarak hidroklorik asit (HCl) kullanıldı. 10 ml bir çözelti için TiO<sub>2</sub> ve Ca madde miktarı hesaplandı. TiO<sub>2</sub> başlangıç malzemesinden 0,005 mol, katkı maddesi olarak Ca ise farklı molar oranlarında (%1, %3, %5 ve %10) katılmak üzere madde miktarları hesabı yapıldı. Hazırlanmak istenen çözelti karışımları tartılarak farklı kaplara eklendi. 10 ml etil alkol içerisine katılan tozlar 15 dakika boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Daha sonra stabilizatör 0,5 ml hidroklorik asit (HCl) eklenip tekrar 15 dakika karıştırıldı. Tüm çözeltiler homojenlik elde edilene kadar 60 dakika manyetik olarak karıştırıldı. Cam altlıklar, ultrasonik banyo kullanılarak sırasıyla aseton ve deiyonize su ile 15 dakika boyunca temizlendi. Altlıklar azot gazı kullanılarak temizlenip kurutuldu. Hazırlanan jel, döndürerek kaplama cihazına yerleştirilen cam altlık üzerine damlatıldı. Döndürme işleminde 30 saniyelik süre ve 1000 rpm dönme hızı kullanıldı. Bu işlem 3 kez tekrarlandı. Kaplama işleminden sonra çözütünün buharlaşması ve organik kirliliklerin uzaklaşması amacıyla altlıklar önceden ısıtılan 150 °C'deki ısıtıcı üzerinde 7 dakika kurutuldu ve bu işlem üçer dakika arayla 4 kez tekrarlandı. Kurutma işleminden sonra altlıklar hava atmosferinde, bir tüp fırın içerisinde 450 °C'de 1 saat tavlandı. Üretilen ince filmlerin yüzey morfolojileri ve optik özellikleri AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu), SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), EDX (Enerji dağılımlı X-Işınları spektrometresi) ve UV-VIS-Nır (Ultraviyole-Görünür bölge spektroskopisi) cihazları ile incelendi. Ölçümlerin tamamı oda sıcaklığında yapıldı.

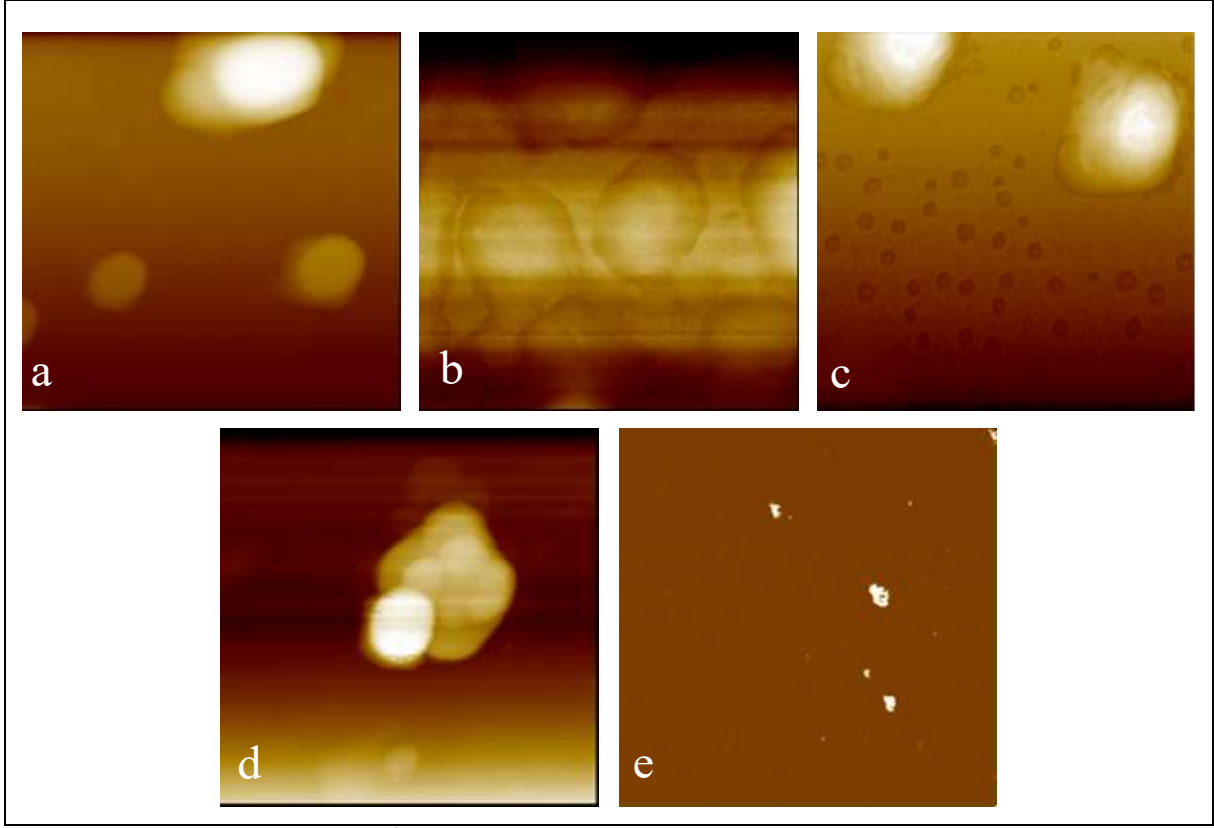
### 3. Bulgular

#### 3.1. Üretilen İnce Filmlerin Morfolojik Karakterizasyonu

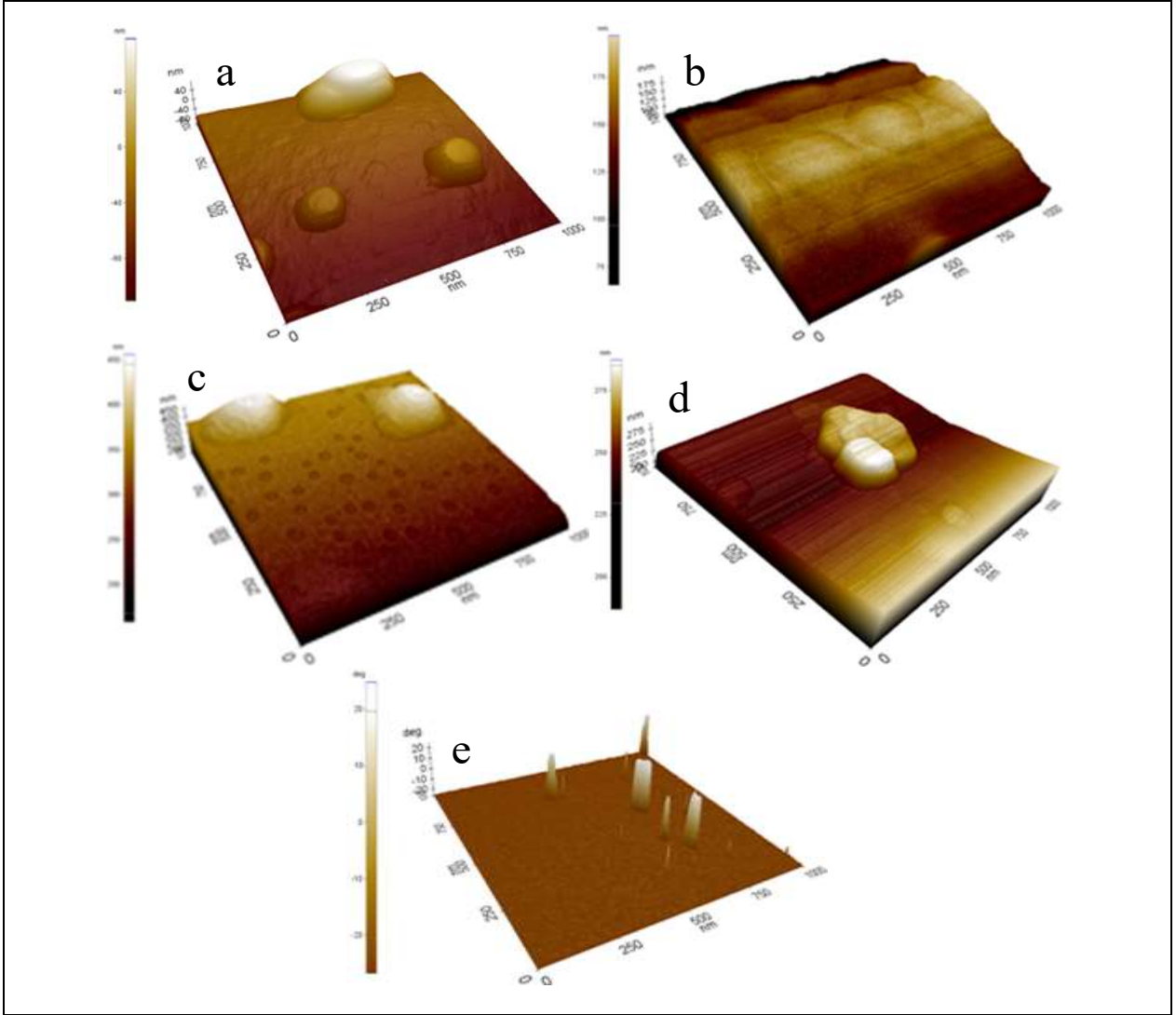
##### 3.1.1. AFM Mikrografları

Sol-jel döndürme ile kaplama yöntemi düşük maliyetli bir yöntem olup, fotovoltaik uygulamalarda ve TiO<sub>2</sub> ince filmlerin üretimi için özellikle uygundur. Ca katkı ve saf TiO<sub>2</sub> çözelti ile kaplanan ince filmlerin yüzey özellikleri ve tane boyutları AFM ile karakterize edilmiştir. 2 boyutlu (1 µm × 1 µm) AFM görüntüleri Şekil 2'de ve 3 boyutlu (1 µm × 1 µm) AFM görüntüleri Şekil 3'de verilmiştir.





**Şekil 2.** Hazırlanan İnce Filmlerin 2 Boyutlu ( $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ ) AFM Yüzey Görüntüleri  
**a)** Katkısız  $\text{TiO}_2$  **b)** %1 Ca katkıli  $\text{TiO}_2$  **c)** %3 Ca katkıli  $\text{TiO}_2$  **d)** %5 Ca katkıli  $\text{TiO}_2$  **e)** %10 Ca katkıli  $\text{TiO}_2$

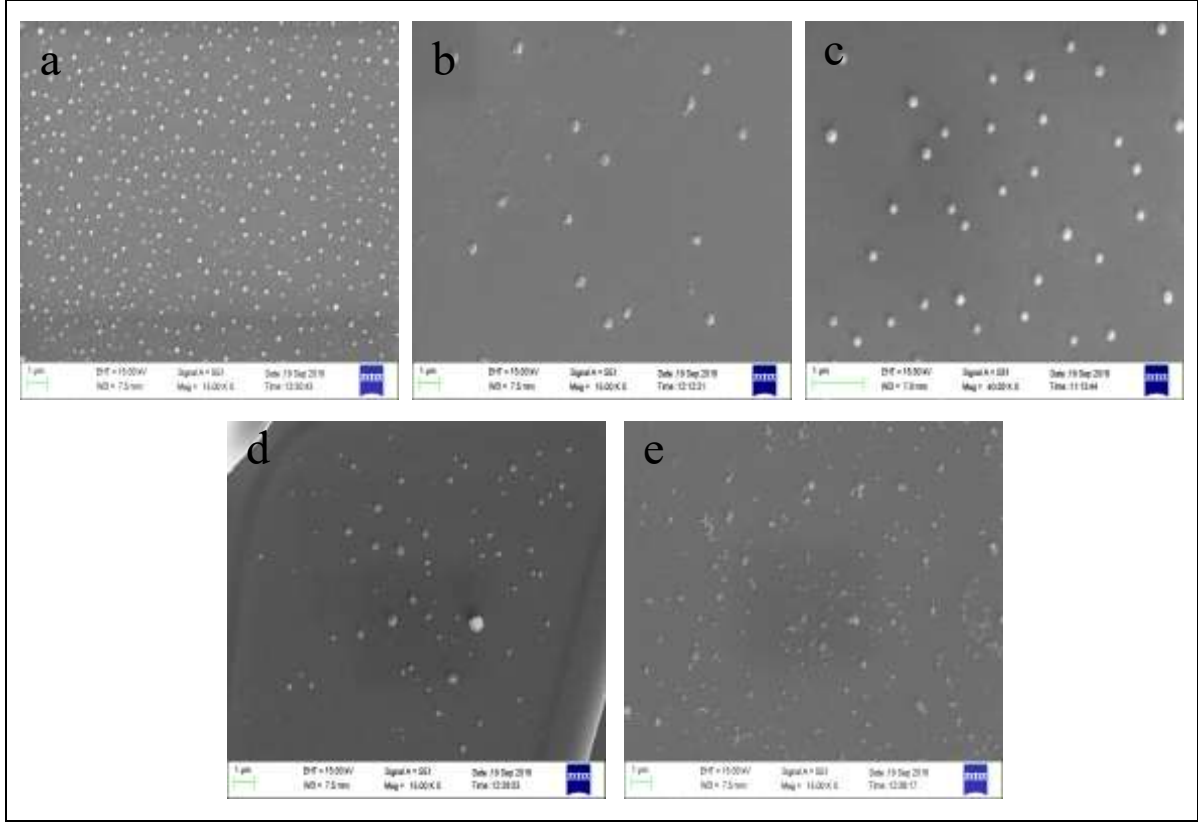


**Şekil 3.** Üretilen Nanomalzeme İnce Filmlerin 3 Boyutlu ( $1\mu\text{m}\times 1\mu\text{m}$ ) AFM Yüzey Görüntüleri  
**a)** Katkısız  $\text{TiO}_2$  **b)** %1 Ca katkılı  $\text{TiO}_2$  **c)** %3 Ca katkılı  $\text{TiO}_2$  **d)** %5 Ca katkılı  $\text{TiO}_2$  **e)** %10 Ca katkılı  $\text{TiO}_2$

Şekil 2 ve Şekil 3’deki AFM görüntülerine bakıldığında nano boyutta tanelerin olduğu görülmüştür [7]. Bazı bölgelerde topaklanmalara rastlandı. Havadaki nemin ve nano boyutlu taneler arası çekimin kuvvetinin yüksek olmasının buna neden olduğu düşünülmektedir. Ca katkı miktarı %3’e kadar artırıldığında tane boyutunda büyümeler gözlenmiştir. Ancak katkı oranının %3’ün üzerine çıkardığımızda tane boyutunda küçülmeler meydana gelmiştir. Bunun sebebi katkı oranının %3’ün üzerine çıkmasıyla  $\text{TiO}_2$  ile etkileşiminde yapıda farklı etki yarattığı ve yüzde katkı oranı değişikliği ile tane boyutunun kontrol edilebilirliği gözlenmiştir. Yapılan incelemede elde edilen bulgular literatürle uyum içerisinde.

### 3.1.2. SEM ve EDX Analizleri

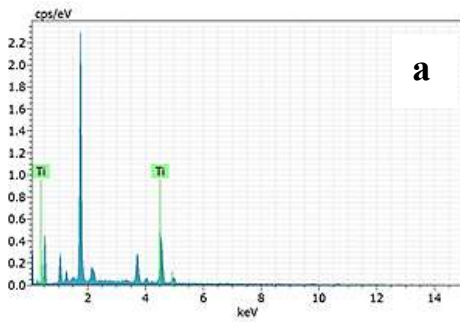
$\text{TiO}_2$  ve etil alkol karışımı ile kaplanmış %1, %3 , %5 ve %10 Ca katkılanmış ince filmlerin 2 boyutlu ( $2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ ) SEM görüntüleri Şekil 4’de görülmektedir. Şekil 4’de görüldüğü üzere saf titanyuma nazaran tanecik yoğunluğu azalan bir morfoloji sergilemektedir. Ancak artan Ca içeriğine bağlı olarak daha yoğun bir tanecik morfolojisi görülmektedir. Taneciklerin genel yapısının küresel formda olduğu görülebilmektedir.



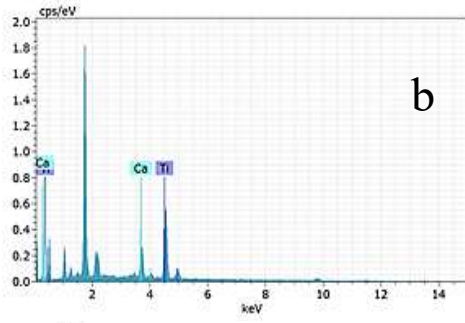
**Şekil 4.** Üretilen Nanomalzeme İnce Filmlerin (1 µ x 1 µ) SEM Yüzey Görüntüleri

**a)** Katkısız  $TiO_2$  **b)** %1 Ca katkılı  $TiO_2$  **c)** %3 Ca katkılı  $TiO_2$  **d)** %5 Ca katkılı  $TiO_2$  **e)** %10 Ca katkılı  $TiO_2$

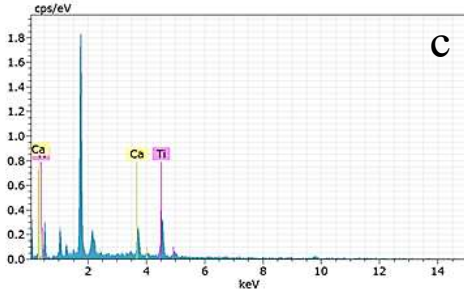
Sol jel döndürerek kaplama yöntemi ile hazırlanan  $TiO_2$  esaslı ince filmlerin EDX analizleri Şekil 5 (a,b,c,d,e)'de görülmektedir. EDX analizlerinde yüksek şiddette Ti ve Ca pikleri elde edilmiştir ve başka herhangi bir yapıya rastlanmamıştır. Üretilen filmlerin atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [2 ve 15].



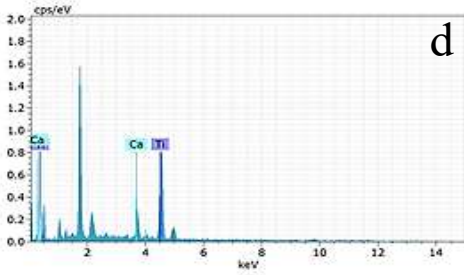
El AN Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C
	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	
Ti 22 K-series	2526	13.26	100.00	100.00
Total: 13.26 100.00 100.0				



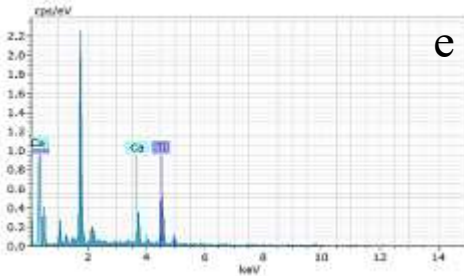
El AN Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C
	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	
Ti 22 K-series	4624	14.50	81.14	78.26
Ca 20 K-series	1828	3.37	18.86	21.74
Total: 17.87 100.00 100.0				



El AN Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C E
	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	
Ti 22 K-series	767	10.27	72.68	69.01
Ca 20 K-series	487	3.86	27.32	30.99
Total: 14.13 100.00 100.0				



El AN Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C
	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	
Ti 22 K-series	2313	20.14	87.99	85.98
Ca 20 K-series	543	2.75	12.01	14.02
Total: 22.89 100.00 100.0				



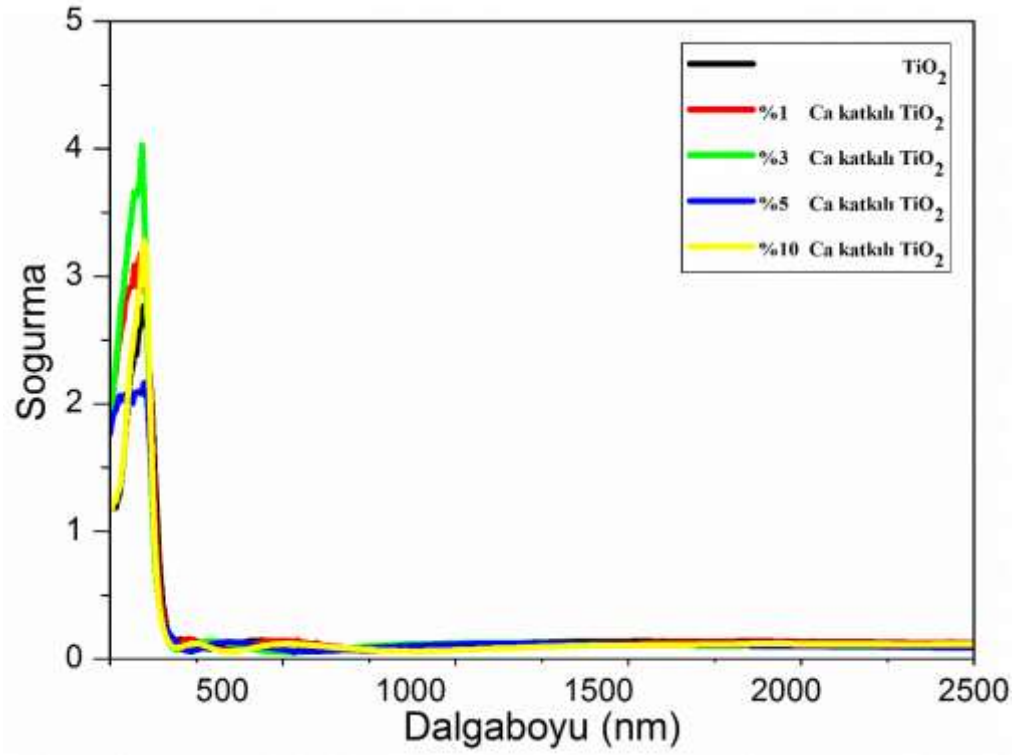
El AN Series	Net un.	C norm.	C Atom.	C
	[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	
Ti 22 K-series	1105	13.42	72.56	68.88
Ca 20 K-series	706	5.08	27.44	31.12
Total: 18.50 100.00 100.0				

Şekil 5. Nanoyapılı İnce Filmlerin EDX Analizleri

a) Katkısız  $TiO_2$  b) %1 Ca katkılı  $TiO_2$  c) %3 Ca katkılı  $TiO_2$  d) %5 Ca katkılı  $TiO_2$  e) %10 Ca katkılı  $TiO_2$

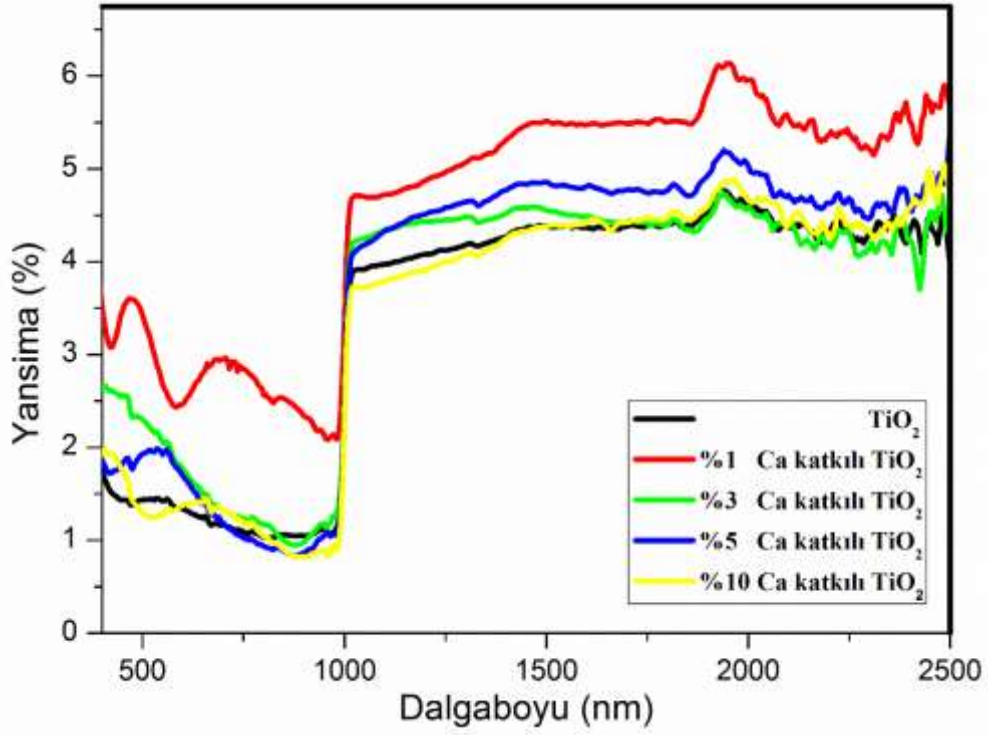
### 3.2. $TiO_2$ İnce Filmlerin Optik Özellikleri

Üretilen filmlerin soğurma  $A(\lambda)$ , yansımaya  $R(\lambda)$  ve geçirgenlik  $T(\lambda)$  grafikleri sırasıyla Şekil 6, 7 ve 8'de gösterilmiştir.



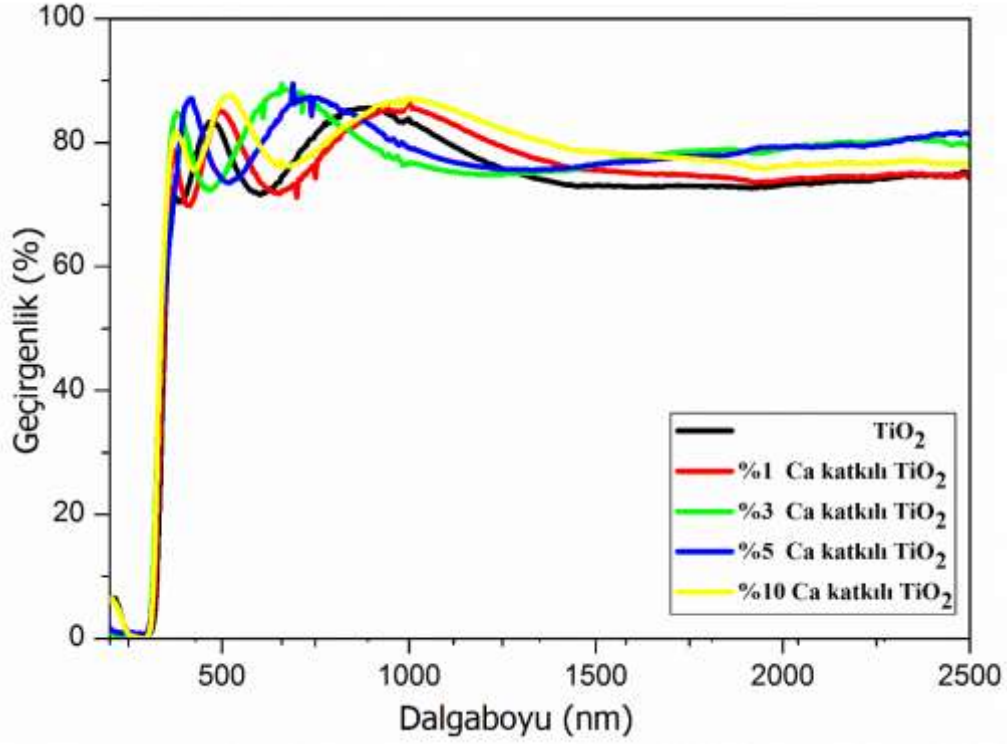
Şekil 6. Numunelere Ait Soğurma Grafikleri.

Şekil 6'da farklı oranlarda Ca katkılandırılmış TiO<sub>2</sub> esaslı filmlerin 0-2500 nm dalga boyu aralığında kaydedilen soğurma spektrumu sergilenmektedir. Numunelerin yüksek şeffaflığa sahip olmasından dolayı görünür bölgedeki ortalama soğurma, yaklaşık %0,75 ile %4,5 aralığındadır. %3 Ca katkı oranına kadar soğurma oranı artış gösterirken %3'ün üzerindeki katkılarda soğurma oranının düştüğü gözlemlenmiştir.



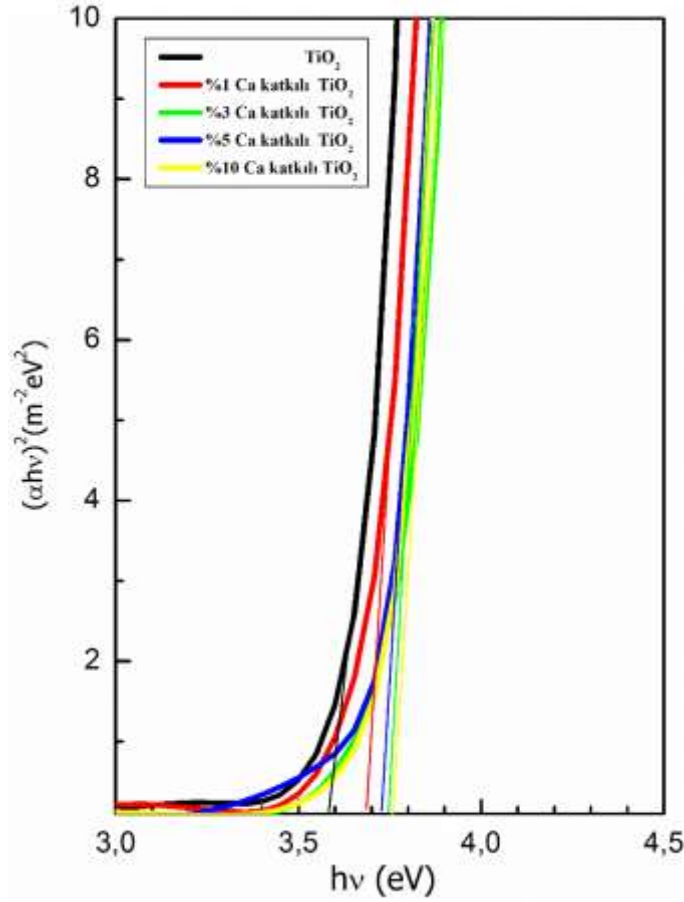
Şekil 7. Numunelere Ait Yansımaya Grafikleri.

Ca katkılı TiO<sub>2</sub> nano yapıları ince filmlere ait yansımaya eğrileri Şekil 7’de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, Ca katkı oranı %3’e kadar yansımaya oranında artışa sebep olurken %3’ün üzerindeki Ca katkıları yansımaya oranının düşüşüne geçtiği gözlemlenmiştir. Yansımaya değerleri 0-2500 nm dalga boyu aralığında değişmekte ve yansımaya oranlarında lineer olmayan değişiklikler olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Numunelere Ait Geçirgenlik Grafikleri.

Numunelerin geçirgenlik grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Numunelere ait geçirgenlik eğrileri incelendiğinde; geçirgenlik değerlerinin %70 ile %90 arasında olduğu tespit edilmiş olup, Ca katkı oranı arttıkça filmlerin kalınlıklarının arttığı ve bu artışa bağlı olarak filmlerden geçen ışığın şiddetinin azaldığı ve optik yoğunluk değerlerinin arttığı görülmektedir. Bu duruma filmlerin geçirgenlik değerlerinin azalmasının neden olabileceği düşünülmektedir. Benzer çalışmalar incelendiğinde saf TiO<sub>2</sub> filmlerin geçirgenlik değeri ortalama %80 ile %90 civarındadır[16].



Şekil 9. Numunelerin  $(\alpha hv)^2 - hv$  grafiği.

Üretilen yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralığı, temel soğurma spektrumu kullanılarak çizilen  $(\alpha hv)^2 - hv$  değişim grafiğinden belirlenmiştir. Bu değişimin lineer kısmının doğrultusunun  $hv$  eksenini  $(\alpha hv)^2 = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri, yarıiletkenin yasak enerji aralığını vermektedir. Yasak enerji aralığının hesaplanmasında Tauc Denklemi olarak bilinen:

$$(\alpha hv)^2 = A(hv - E_g)$$

formülü kullanılmıştır. Burada,  $\alpha$ ; soğurma katsayısı,  $hv$ ; foton enerjisi,  $E_g$ ; Yasak Enerji aralığı ve  $A$ ; sabittir. Üretilen nano yapılı ince filmlerin yasak enerji aralığını belirlemek için çizilen  $(\alpha hv)^2 - hv$  grafikleri Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'daki grafikler yardımı ile numunelerin yasak enerji aralıkları ( $E_g$ ) hesaplanmıştır. Şekil 9 incelendiğinde, en düşük yasak enerji aralığına sahip numunenin katkısız  $TiO_2$  (3.59 eV) olduğu görülmektedir. Numunelerin yasak enerji aralığı Ca katkısı ile (%1 Ca 3.68 eV, %3 Ca 3.76 eV, %5 Ca 3.74 eV ve %10 Ca 3.77 eV) artmıştır. Ca katkısı ile ince filmlerin yasak enerji aralıklarındaki artış,  $TiO_2$ 'nin bant yapısındaki modifikasyona atfedilebilir. Çünkü Fermi seviyesi taşıyıcı konsantrasyondaki artışa bağlı olarak iletim bandına yaklaştığında, düşük enerji geçişleri bloke edilir ve yasak enerji aralığı değeri artar[17]. Katkılama yoluyla enerji bantlarının genişleme etkisi göstermesi Burstein-Moss bant doldurma etkisi olarak adlandırılır.

#### 4. Sonuçlar Ve Tartışma

- Bu çalışmada son dönemlerin en gözde konularından biri olan sol-jel döndürerek kaplama yöntemi kullanılmıştır. Katkısız ve farklı oranlarda (%1, %3, %5, %10) Ca katkılı  $TiO_2$  esaslı nano yapılı ince filmler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Yapılan farklı katkı oranları çalışmayı özgün kılmıştır.
- Günümüzün en yeni ve en popüler teknolojilerinden biri olan nanoteknoloji ve ince film üretim yöntemi birleştirilerek yapılan bu çalışma sonunda,  $TiO_2$  esaslı ince filmlerin Ca katkı oranına bağlı olarak nano yapısının değiştiği tespit edilmiştir.



- Teknolojik uygulamalarda önemli bir yeri olan yarıiletken film üretimine yönelik bu çalışmada, özellikle maliyet açısından pahalı diğer üretim yöntemlerine alternatif olarak TiO<sub>2</sub> ince filmlerin üretilmesi ve farklı malzemeler katkılama imkânı ile özelliklerinin değiştirilmesine olanak sağlanabilmesi açısından önem arz etmektedir.
- AFM analizleri incelendiğinde; nano boyutta tanelerin olduğu görülmüştür. Ca katkı miktarı %3'e kadar artırıldığında tane boyutunda büyümeler gözlenmiştir. Ancak katkı oranının %3'ün üzerine çıkardığımızda tane boyutunda küçülmeler meydana geldiği tespit edilmiştir. Elde edilen bulguların literatürle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.
- SEM analizleri incelendiğinde; saf titanyuma nazaran katkılanan Ca içeriğine bağlı olarak tanecik yoğunluğu azalan bir morfoloji sergilemiştir. Ancak artan Ca içeriğine bağlı olarak daha yoğun bir tanecik morfolojisi görülmüştür. Taneciklerin küresel yapıda olduğu gözlemlenmiştir.
- EDX analizlerinde; yüksek şiddette TiO<sub>2</sub> ve Ca pikleri elde edilmiştir ve başka herhangi bir yapıya rastlanmamıştır. Üretilen filmin atomik olarak literatür ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.
- Üretilen filmlerin yasak enerji aralıkları incelendiğinde en düşük yasak enerji aralığına sahip numunenin katkısız TiO<sub>2</sub> (3.59 eV) olduğu görüldü. Numunelerin yasak enerji aralığı % 1, 3, 5 ve 10 oranlarında Ca katkısı ile (%1 Ca 3.68 eV, %3 Ca 3.76 eV, %5 Ca 3.74 eV ve %10 Ca 3.77 ) arttığı tespit edildi. Hesaplanan yasak enerji aralıklarının literatürle uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Bu çalışmanın geliştirilerek mikro ölçekte yeni pek çok elektronik aygıt ve sensörün tasarlanmasından üretilmesine tüm süreçte fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri yönetim birimi (Proje No: TEKF.20.19) tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] S. Çulhaoğlu, Bor ve Azot Katkılı TiO<sub>2</sub> İnce Filmlerin Fotokatalitik Aktivitelerinin İncelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Mayıs 2015.
- [2] E. D. Şam, Saf ve Katkılı TiO<sub>2</sub> Filmlerin Optik, Yapısal ve Fotoaktivite Özellikleri. Doktora Tezi, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Şubat 2007.
- [3] V. Ataş, Döndürerek Kaplama Yöntemiyle Elde Edilen TiO<sub>2</sub> Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı Katı Hal Fiziği Bilim Dalı, Mart 2014.
- [4] S. Yaşar, Titanyum Oksit Yarıiletken Filminin Elde Edilmesi, Optik ve Kristal Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı, Temmuz 2012.
- [5] D. Ş. Özden Dinç, Yüzeylerin Titanyum Nanoçubuklar ve Onların Altın/Gümüş ile Modifiye Formları İle Nanodenselenmesi Ve Farklı Alanlarda Kullanılabilirliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Biyomühendislik Anabilim Dalı, Haziran 2018.
- [6] N. Kati, Investigation of Optical and Morphological Properties of Co Doped ZnO Nanomaterials. Turkish Journal of Science and Technology, 14: 1 (2019) 41-48.
- [7] M. İlhan, Dört Bileşenli Fonksiyonel Yarıiletken İnfrared Fotodedektörlerinin Üretilmesi Ve Elektronik Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Fizik Anabilim Dalı, 2019.
- [8] M. Streckova, T. Sopcak, R. Stulažterova, M. Giretova, L. Medvecký, A. Kovalcikova, K. Balazsi, Needle-less electrospinning employed for calcium and magnesium phosphate coatings on titanium substrates. Surface and Coatings Technology, 340 (2018)177-189.
- [9] L. E. Pérez-Jiménez, J. C. Solis-Cortazar, L. Rojas-Blanco, G. Perez-Hernandez, O. S. Martinez, R. C. Palomera, E. R. Morales, Enhancement of optoelectronic properties of TiO<sub>2</sub> films containing Pt nanoparticles. Results in Physics, 12 (2019) 1680-1685.
- [10] M. Biglar, F. Stachowicz, T. Trzepieciński, M. Gromada, Modelling of Barium Titanate Microstructure Based on Both the Boundary Element Method and a Homogenization Technique. Procedia Structural Integrity, 5 (2017) 562-568.
- [11] M. Singh, B. C. Yadav, A. Ranjan, M. Kaur, S. K. Gupta, Synthesis and characterization of perovskite barium titanate thin film and its application as LPG sensor. Sensors and actuators b: chemical, 241 (2017) 1170-1178.
- [12] N. D. Patel, M. H. Mangrola, K. G. Soni, V. G. Joshi, Structural and electrical properties of nanocrystalline barium strontium titanate. Materials Today: Proceedings, 4: 2 (2017) 3842-3851.

- [13] K. D. Lakshmi, T. S. Rao, J. S. Padmaja, I. M. Raju, S. A. Alim, P. Kalyani, Visible light driven mesoporous Mn and S co-doped TiO<sub>2</sub> nano material: Characterization and applications in photocatalytic degradation of indigocarmine dye and antibacterial activity. *Environmental nanotechnology, monitoring & management*, 10 (2018) 494-504.
- [14] URL-1 <https://yusufbilgen.wordpress.com/2015/01/16/ince-film-teknikleri/>
- [15] F. Ersan, H. Derin, Effect of substrate temperature on structural and optical properties of copper sulphide thin films, *balkan physics letters*, 2013, 21, 211025, pp. 234-244.
- [16] H. Sarıgöl, İ. Sorar, Sol-Jel Yöntemiyle Hazırlanan TiO<sub>2</sub> Filmlerin Optik ve Elektrokromik Özellikleri, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi* 2016, 2: 81-88 DOI:10.7240/mufbed.14319.
- [17] C. Aydın, Farklı Molar Oranlarında, Eşit Miktarlarda Mn-Ni Katkılandırılmış ZnO Esaslı Nano Yapılı İnce Filmlerin Yüzey Morfolojisi, Optik Sabitleri ve Dispersiyon Enerji Parametreleri, *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 29 (2), 221-232, 2018.



## Çapraz Bağlı Kitosan/Selüloz/Grafen Kompozitinin Şişme Davranışlarının İncelenmesi

Betül ÇİÇEK ÖZKAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> bcozkan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 12/01/2020;

Kabul/Accepted: 08/02/2021)

**Öz:** Kitosan/selüloz biyopolimer matrisi grafen ile katkılıandıktan sonra basit ve pratik bir yolla çapraz bağlı üçlü absorban kompozit sistemi üretildi. Kitosan iyi film özelliği gösteren, birçok fonksiyonel gruba ve geniş kullanım alanına sahip, yeryüzünde selülozdan sonra en çok bulunan ikinci biyopolimer malzemedir. Kitosanın düşük mekanik özelliklerini arttırmak ve kırılma yapısını elimine ederek daha esnek bir yapı elde etmek için selüloz ile karıştırıldı. Bu biyopolimer karışım, üretilecek malzemeye iletkenlik kazandırmak ve geniş kullanım alanına sahip bir malzeme üretebilmek için grafen ile katkılıandı. Bu kapsamda üç farklı oranda çapraz bağlayıcı kullanılarak hazırlanan kompozitlerin sıvı absorplama özelliklerine pH'ın ve çapraz bağlayıcı miktarının etkisini araştırmak amacıyla şişme testleri yapıldı. Çapraz bağlayıcı olarak glutaraldehit kullanıldı. Artan çapraz bağlayıcı miktarı ve pH ile birlikte şişme ve absorplanan sıvı oranının azaldığı gözlemlendi. Hazırlanan kompozitlerin mekanik özellikleri çekme testleri ile araştırıldı ve çapraz bağlayıcı miktarı kompozitin çekme dayanımını arttırırken bu artışın çapraz bağlayıcı miktarı ile orantılı olmadığı tespit edildi. Hazırlanan kompozitin yapısal ve moleküler özellikleri FT-IR ve FESEM analizleri ile tespit edildi. Bu analizlerin sonucunda üç bileşenin birbiri içerisinde iyi bir biçimde dağıldığı, bu bileşenler arasında molekül içi ve moleküller arası bağlar ve sinerjik etki sebebiyle güçlü bir etkileşimin olduğu bunun sonucunda da kompozitin yeniden yapılandığı gösterildi.

**Anahtar kelimeler:** Kitosan, Grafen, Selüloz, Çapraz Bağlanma.

### Investigation of Swelling Behavior of Cross-Linked Chitosan / Cellulose / Graphene Composite

**Abstract:** The chitosan / cellulose biopolymer matrix was filled with graphene and a cross-linked ternary absorbent composite system was produced in an easy and practical way. Chitosan is the second most abundant biopolymer material after cellulose, with many functional groups and wide usage areas, showing good film properties. Chitosan with having many functional groups and wide usage areas, showing good film properties is the second most abundant biopolymer material after cellulose. The chitosan/cellulose blend was prepared in order to change the brittle structure of chitosan and to obtain the more flexible material network. Biopolymer blend was filled with graphene to increase the mechanical strength of produced composite material and to produce a conductive and widely used material. In this context, the effect of pH and the amount of crosslinker on the liquid absorption properties of composites prepared with three different amount of crosslinker was investigated by swelling tests. Glutaraldehyde was used as the crosslinker. It was observed that swelling and absorbed liquid ratio decreased with increasing amount of crosslinker and pH. The mechanical properties of the prepared composites were investigated by tensile tests and it was determined the increasing amount of crosslinker increases the tensile strength of the composite and this increase is not proportional to the amount of crosslinker. The structural and molecular properties of the prepared composite were determined by FT-IR and FESEM analysis. As a result of these analyzes, it has been shown the three components were well dispersed in this composite system. Besides them, it was figure out a strong interaction between these components due to the intramolecular and intermolecular bonds and synergistic effect.

**Key words:** Chitosan, Graphene, Cellulose, Crosslinking.

#### 1. Giriş

Süper emici (süper absorban - SA) malzemeler akışkan maddeleri, vücut sıvılarını ve kan çözeltilerini absorbe etme yeteneğine sahip üçboyutlu, çapraz bağlı, hidrofil ve lineer ya da dallanmış yapıdaki polimerlerdir. Süper absorbanlar hidrofil ve yüksek şişme kapasitesine sahip olmaları sebebiyle kişisel bakım ürünlerinde, biyomedikal uygulamalarda, tarımda, ağır metallerin uzaklaştırılmasında ve ilaç taşıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Sentetik polimerlerden süper absorban malzeme üretimi oldukça yaygın olmakla birlikte bunların zararları göz önüne alınarak günümüzde doğal malzemelerden süper absorban üretimi de ilgi çekmekte ve birçok bilimsel çalışmanın konusu olmaktadır. Çapraz bağlanma reaksiyonu SA'yı kendi molekül yapısı içerisinde hareketsizleştirir ve malzemenin mekanik dayanımını ve su içerisinde çözülmesine engel olur. Çapraz bağlanma yoğunluğu ve yüklü grupların malzemenin absorpsiyon kapasitesini direk etkilemektedir. Selüloz bazlı süper

\* Sorumlu yazar: [bcozkan@firat.edu.tr](mailto:bcozkan@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0002-8852-6650

absorbanlar gibi doğal polimerler sentetik polimerler göre çok daha iyi biyoyumludurlar ve gizli toksisiteleri çok daha düşüktür [1].

Selüloz (S), 100'ün üzerinde tekrara sahip  $\beta(1\rightarrow4)$  ile bağlı D-glikoz birimlerinden oluşan, kimyasal formülü  $(C_6H_{10}O_5)_n$  olan, doğada bol bulunan, yenilenebilir ve sürekliliği olan polisakkarit grubunun bir üyesidir. Selülozun kullanımı fiber ya da fiber türevi olan ve geniş bir ürün yelpazesine dayanmaktadır. Kitosan (C) kitinin N-deasetilasyonu sonucu elde edilen glikozamin ve N-asetilglikozamin birimlerinden oluşan doğal bir polimer malzemedir. Aynı zamanda kitosan biyoyumlu, biyobozunur ve yaygın olarak bulunan bir biyokütleden ucuz olarak üretilip çeşitlendirilebilir olması sebebiyle geniş ölçüde araştırılmış ve günümüzde araştırılmaya devam etmektedir [2] [3] [4]. Ayrıca kitosan antibakteriyel, hemostatik ve yara iyileştirme özelliğinden dolayı biyomedikal alanda, gübre olarak tarımda, stabilizör ve kıvam arttırıcı olarak gıda endüstrisinde ve iyon değiştirici olarak su arıtma işlemlerinde kullanılmaktadır [5] [6]. Ancak, kitosanın tek başına kullanılmasıyla üretilen filmlerin düşük mukavemet göstermesi kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Kitosanın katyonik yapısı diğer negatif yüklü sentetik veya doğal polimerler ile elektrostatik kompleksler ya da çok tabakalı yapılar oluşumuna imkan sağlar. Kitosanın amino ( $-NH_2$ ) ve hidroksil ( $-OH$ ) grupları selüloz ve nişasta gibi doğal hidrofilik moleküllere spesifik aşılama ve çapraz bağlanma reaksiyonları ile bağlanabilir. Kimyasal çapraz bağlanma malzemenin mekanik, termal ve kimyasal stabilite özelliklerinin arttırılabildiği polimer nano yapılar tasarlamak ve modifiye etmek için kullanılabilen çok yönlü bir yöntemdir. Çapraz bağlayıcılar molekülleri birbirine bağlar, molekül ağırlığını arttırır ve genellikle daha yüksek mekanik özellikler ve gelişmiş stabilite sağlar. Bununla birlikte, çapraz bağlanma malzemenin parçalanabilirliğinin ve fonksiyonel grupların azalmasına, polimerin reolojik özelliklerini değiştirerek işlem zorluğuna yol açar [7]. Bu bağlamda malzeme üretilirken kullanım amacına ve ihtiyaca göre uygun yöntem seçilerek hazırlanmalıdır. Malzemeyi modifiye etmek, bozulma direncini arttırmak ve stabilize etmek için formaldehit, glutaraldehit, epoksi bileşikler ve karboimid gibi yapay çapraz bağlayıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Glutaraldehit kullanılarak gerçekleştirilen çapraz bağlanma işlemi ekonomik ve basit bir çapraz bağlanma yöntemidir. İki boyutlu yapısı, mükemmel termal, elektriksel ve mekanik özellikleri ile grafen (G) yeni malzemeler üretmek için biyopolimer matris içerisinde iyi bir biçimde dağılıbilir [8] [9]. G'nin üstün özellikleri, selülozun iyi mekanik ve kimyasal yapı özellikleri ve kitosanın antibakteriyel, biyoyumluluk özellikleri ve fonksiyonel grupları yardımıyla çapraz bağlı geliştirilmiş özellikleri ile üçlü biyo-nano kompozit sistemi üretilebilir. Selüloz, kitosan ve grafen kullanılarak üretilmiş kompozit malzemeler ilaç taşıma sistemleri [10], paketlenme [11], kaplama [12], membranlar [13], implantlar [14], doku mühendisliği [15], yara örtüsü [16], su arıtma [17] ve akıllı tekstiller [18] gibi birçok uygulama alanı bulabilmektedir.

Grafen (G) çok iyi iletkenlik, hızlı elektron transferi, geniş düzlemsel yüzey alanı, yüksek mekanik dayanımı ve kolayca fonksiyonlandırılabilme gibi üstün özelliklere sahip iki boyutlu (2D), düzlemsel yapılı, sıfır bant aralıklı bir karbon allotropudur [19]. G özellikle polimer kompozitlerde nano-güçlendirme için üstünlük yaratan mükemmel elektriksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Buna ilaveten, G'nin dolgu malzemesi olarak üstün özellikler gösterirken son yıllarda antibakteriyel etkisi de keşfedilmiştir. Bu özellik G'nin kullanım alanlarını genişletmektedir. G bazı biyokompozitler biyogörüntüleme, ilaç taşıma, nanotıp, biyosensörler gibi birçok alanda araştırılmakta ve kullanılmaktadır. Grafen ve kompozitleri geniş yüzey alanına sahiptir ve bu özellik malzemenin kullanım alanına göre performansını arttırır [20] [21].

Bu çalışmada S/C/G üçlü kompozit sisteminin farklı oranlarda glutaraldehit kullanılarak çapraz bağlanma yöntemiyle üretilmesi, glutaraldehit konsantrasyonunun hazırlanan kompozitin şişme ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması ve kompozitin sıvı absorpsiyon oranının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1 Materyal

Grafen nanoplateletler (Safılık: 99.9%, Boyut: 3 nm, Yüzey Alanı: 800 m<sup>2</sup>/g, Çap: 1.5  $\mu$ m) Nanografi'den, düşük molekül ağırlıklı C (deasetilasyon derecesi: 80%) Sigma-Aldrich'den temin edilmiştir. Glutaraldehit ( % 25'lik Sulu Çözelti, Sigma-Aldrich), Sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 95.0–98.0 wt. %, Vetec, P.A.), Sodyum Klorit (NaClO<sub>2</sub>, technical grade, 80%, Sigma-Aldrich), mutlak asetik asit (Sigma-Aldrich), sodyum hidroksit (NaOH, Sigma-Aldrich), Sodyum Dihidrojen Fosfat dihidrat (NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>\*2H<sub>2</sub>O, Merck Millipore) temin edildiği şekilde kullanılmıştır.

## 2.2 At Kestanesi Kabuğundan Selüloz Ekstraksiyonu

Fırat Üniversitesi Kampüsünden toplanan atkestanesi kabuklarından selüloz elde edildi. At kestanesi tohumlarının kabukları ve içi birbirinden ayrıldıktan sonra kabukları kesici mikser yardımıyla öğütüldü. Öğütülen kabuklar mekanik karıştırıcıda 4 saat boyunca 80 °C'deki ağırlıkça 4%'lük NaOH çözeltisi içerisinde karıştırıldı. Alkali işlemi dört kez tekrar edildi ve her muameleden sonra alkali ortamda çözünabilir kısmın temizlenmesi için yıkandı, filtrelendi ve 60 °C'deki hava sirkülasyonlu fırında 24 saat boyunca kurutuldu. Alkali işlemin ardından eşit hacimde (v:v) asetat tampon çözeltisi (8,1 g NaOH ve 22,5 mL saf asetik asit 300 mL suda) ve sulu sodyum klorit çözeltisi (1,7 wt.% NaClO<sub>2</sub> suda) ile arda kalan lignini uzaklaştırmak ve α-selüloz elde etmek için ağartma işlemi yapıldı. Ağartma işlemi 4 kez (80 °C'de ve 4 saat boyunca) tekrarlandı. Her işlemin ardından ağartılan fiberler saf su ile ortam nötrleşinceye kadar yıkandı ve filtrelendi.

## 2.2 Numune Hazırlanması

C ve S 40 mL hacimce % 0.5'lik hacimce (v/v) asetik asit çözeltisi içerisinde 1 saat boyunca oda sıcaklığında karıştırıldı. Ardından C/S blendine grafen ilave edilerek 4 saat mekanik karıştırıcıda ve 1 saat sonikatörde karıştırıldı. Ardından karışıma oda sıcaklığında hacimce yüzde 0.5, 1.5 ve 2.5 oranında glutaraldehit çözeltilerinden eklenip karıştırılarak kalıp içerisinde çapraz bağlanma reaksiyonu gerçekleştirildi (Tablo 1). Kompozit bileşenlerinin oranları daha önce yapılan çalışmalar referans alınarak belirlenmiştir [1]. GA miktarı ise ilgili literatüre dayanılarak GA'nın bağlanacağı NH<sub>2</sub> grubu oranına göre belirlenmiştir [13].

**Tablo 1.** Hazırlanan kompozitlerin bileşenleri

Numune	GA (% v/v)	C (% w/w)	S (% w/w)	G (% w/w)
N1	0.5	49	49	2
N2	1.5	49	49	2
N3	2.5	49	49	2

## 2.3 Karakterizasyon

FTIR spektroskopisi (Thermo Scientific, Nicolet iS20 ) 4000 ile 550 cm<sup>-1</sup> aralığında, 4 cm<sup>-1</sup> çözünürlükte çeşitli işlemler sonucunda fonksiyonel gruplarda meydana gelen değişiklikleri araştırmak amacıyla yapıldı. Morfolojik araştırmalar Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) (ZEISS Sigma 300) Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılarak gerçekleştirildi. Numune yüzeyleri elektriksel iletkenliği sağlamak amacıyla mikroskobik taramadan önce ince altın film ile kaplandı.

### Şişme Testleri

Hazırlanan numunelerin şişme davranışlarını ve sıvı absorpsiyon kapasitelerini araştırmak için şişme testleri üç farklı pH'ta (3.0, 5.5 ve 7.4) fosfat tampon çözeltisi içerisinde gerçekleştirildi. Kuru haldeki kompozitler tartılarak farklı pH'lardaki tampon çözeltiler içerisinde bekletildi. Periyodik zaman aralıklarında şişme dengesine ulaşıncaya kadar tartımlar yapıldı. Denge şişme kapasitesi (DSK) aşağıdaki Eşitlik 1 yardımıyla hesaplandı.

$$DSK (\%) = \frac{W_S - W_D}{W_D} \times 100 \quad (1)$$

Burada sırasıyla W<sub>S</sub> şişmiş ve W<sub>D</sub> ise sırasıyla kuru malzeme ağırlığıdır.

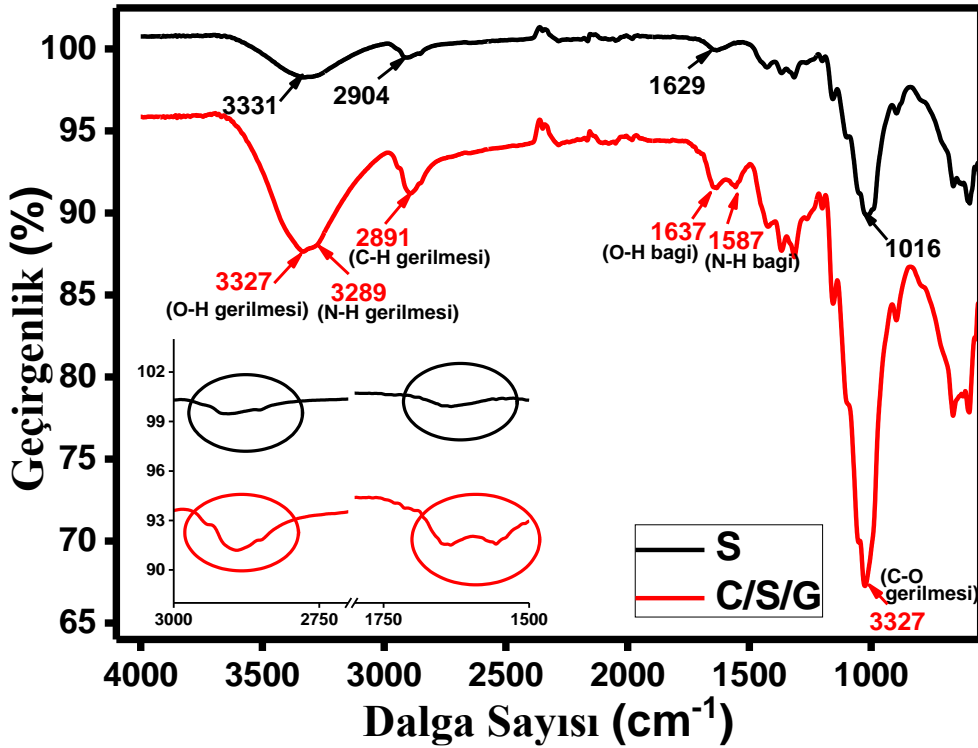
### Mekanik Özellikler

Hazırlanan kompozitlerin mekanik özellikleri Instron 8503 Çekme Test Cihazı kullanılarak belirlendi. Numune ölçüm boyu uzunluğu (gauge lengths) 5mm ve gerilme hızı 1mm/s dir. Deneylerin tekrarlanabilirliği tasdik etmek amacıyla her test 3 kez tekrarlandı. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

### 3. Sonuçlar ve Tartışma

#### 3.1 FT-IR Karakterizasyonu

Atkestanesi kabuğundan üretilmiş selülozun ve glutaraldehit ile çapraz bağlanmış kompozit C/S/G'nin molekül yapısını incelemek amacıyla FT-IR analizi yapılmıştır. C'nin karakteristik pikleri 3363, 3289, 2869, 1653, 1587 ve 1027  $\text{cm}^{-1}$ 'de ortaya çıkmaktadır ve bunlar sırasıyla O-H gerilmesi, N-H gerilmesi, C-H gerilmesi, O-H bağı, N-H bağı ve C-O gerilmesi ile ilişkili titreşimleri göstermektedir [22]. S'nin karakteristik FT-IR spektrumları 3331, 2904, 1629 ve 1016  $\text{cm}^{-1}$ 'dir ve bunlar sırasıyla O-H gerilmesi, C-H gerilmesi, O-H bağı ve C-O gerilmesi ile ilişkili titreşimleri ifade eder. C'nin ve S'nin molekül yapısı oldukça benzer olmakla birlikte aralarındaki temel fark C'nin sahip olduğu  $\text{NH}_2$  grupları sebebiyle oluşan 3289 ve 1587  $\text{cm}^{-1}$ 'deki N-H gerilmesine ve bağına ait spektrumlar ile açıklanabilir. Şekil 1'de görüldüğü gibi C/S/G kompoziti C ve S'ye ait bütün karakteristik pikleri göstermektedir. Ancak grafene ait fonksiyonel grup bulunmaması sebebiyle kompozite ait FT-IR spektrumunda grafen tespit edilememektedir [23]. Glutaraldehit ile çapraz bağlanmış kompozitin hem S'nin hem de C'nin karakteristik spektrumlarını göstermesi kullanılan bileşenlerin kompozit sisteminde iyi bir biçimde dağıldığını göstermektedir. Ayrıca geçirgenlik yoğunluğunun selüloza göre düşük olması C, S ve G arasındaki güçlü etkileşimi ifade etmektedir. Bunun yanında iç grafikte görüldüğü gibi C ve S'ye ait O-H ve C'ye ait N-H grupları arasındaki molekül içi ve moleküller arası etkileşimler, çapraz bağlanma ve hidrojen bağları sebebiyle saf S'ye göre absorbands eğrisinde bir artış görülür. Bu durum ilgili literatür ile teyit edilmiştir [24].

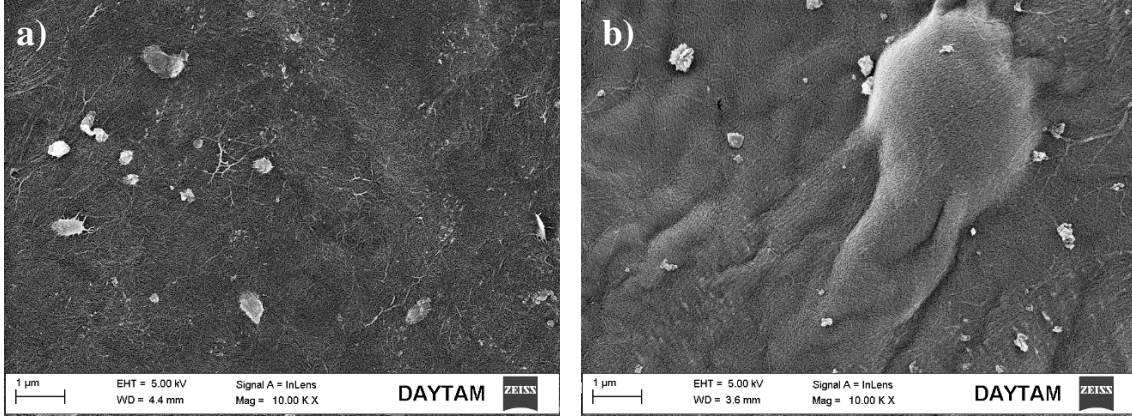


Şekil 1. S ve C/S/G'ye ait FT-IR spektrumu

#### 3.2 Morfolojik Özellikler

Atkestanesi kabuğundan üretilen S ve C/S/G kompozitinin morfolojik özellikleri FESEM ile araştırıldı. G'nin ince levha şeklindeki görünümü ve C'nin bantlı yapısı bir araya geldiğinde kendiliğinden agregasyona sebep olduğu önceki çalışmalara belirtilmiştir [25]. Şekil 2-a'da gösterilen S'ye ait FESEM fotoğrafı fiberlerin homojen yapısını ve yoğun lif demetini göstermektedir. C/S/G kompozitinin, yapısını oluşturan bileşenlerinin temel özelliklerini taşıdığı (S'nin geniş ve yoğun lifli yapısı ve C/G'nin bantlı film yapısı) Şekil 2-b'de görülmektedir. S'de görülen belirgin lif yapısı C ve G ile etkileştirildikten sonra molekül içi ve moleküller arası etkileşim, hidrojen bağları ve çapraz bağlar sebebiyle C/S/G kompozitinde kısmen azalmıştır. Daha önce yapılmış ilgili çalışmalarda

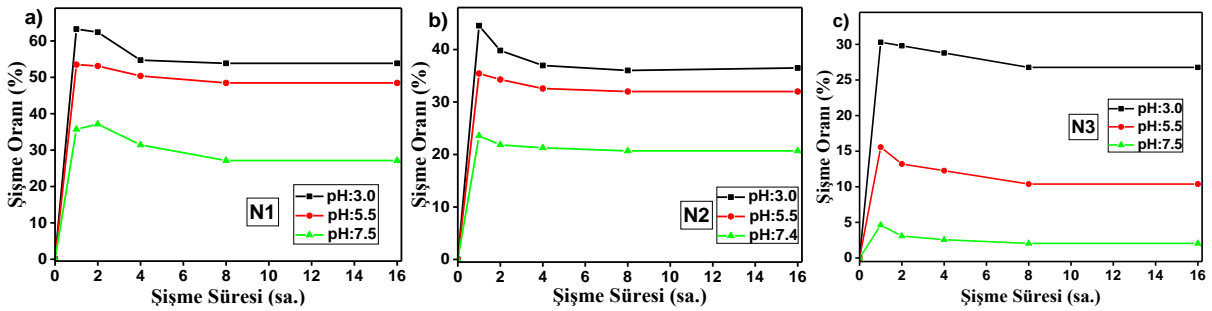
belirtildiği gibi çapraz bağlanma reaksiyonu malzemenin morfolojisinde, yapısında, sertliğinde ve gözenekliliğinde değişim meydana gelmesine sebep olur [26][17]. Ayrıca Rodríguez ve diğerleri tarafından rapor edildiği gibi G'nin az bir miktarı bile malzemenin morfolojisinde değişiklikler meydana gelmesine sebep olabilir [27]. Üç bileşenin kompozit sistemi içerisinde iyi bir biçimde dağılması ve birbirleri arasındaki güçlü etkileşim sebebiyle C/S/G kompoziti öncüllerinin temel özelliklerini taşımakla birlikte yeniden yapılanmıştır.



Şekil 2. a) S ve b) C/S/G'nin FESEM fotoğrafı

### 3.3 C/S/G Kompozitinin Şişme Davranışları

Kompozitin moleküler yapısında yapıtaşlarına göre meydana gelecek değişiklikler malzemenin fiziksel özelliklerini de değiştirebilir. Bu değişiklikler FT-IR spektrumu, morfolojik çalışmalar, şişme testleri ve mekanik testler ile belirlenebilir. 3 farklı çapraz bağlayıcı (GA) konsantrasyonunda hazırlanan C/S/G kompozitlerinin şişme testleri fosfat tamponu içerisinde pH 3.0, 5.5 ve 7.4 'ta maksimum şişme kapasitesine ulaşmaya kadar oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3-a,b,c). Bu pH değerleri insan vücudunda karşılaşılabilecek ortamların pH değerleri ile uyumlu olması için seçilmiş ortalama değerlerdir. N1'in maksimum absorpsiyon kapasitesi pH 3.0, 5.5 ve 7.4 için sırasıyla % 63, 53 ve 35'tir (Şekil 3-a). Bunun ardından dengeye ulaşmaya kadar şişme oranının azaldığı gözlenir. Kompozitin şişme değerleri artan pH ile birlikte kitosanın amin grupları ile uyumlu olarak azalır. Bu kitosanın NH<sub>2</sub> gruplarının asidik ortamda iyonlaşarak NH<sub>3</sub><sup>+</sup> formuna dönüşmesi ve bu dönüşümün kompozit ağının genişlemesine ve daha fazla suyu bünyesine almasına sebep olmasından kaynaklanır [28][29]. Ayrıca C ve S amorf ve kristal kısımlardan oluşan yarı kristal malzemelerdir ve bunların amorf bölümleri yüksek oranda -OH grubu içerir. Bu -OH grupları sıvı absorpsiyon kapasitesini artırır. N2 ve N3 numunelerinde de N1 numunesine benzer olarak artan pH ile birlikte şişme oranında azalma eğilimi görülmektedir.



Şekil 3. a) N1, b) N2 ve c) N3 kompozitinin pH 3.0, 5.5 ve 7.4'te, oda sıcaklığında, 16 saat boyunca şişme davranışları

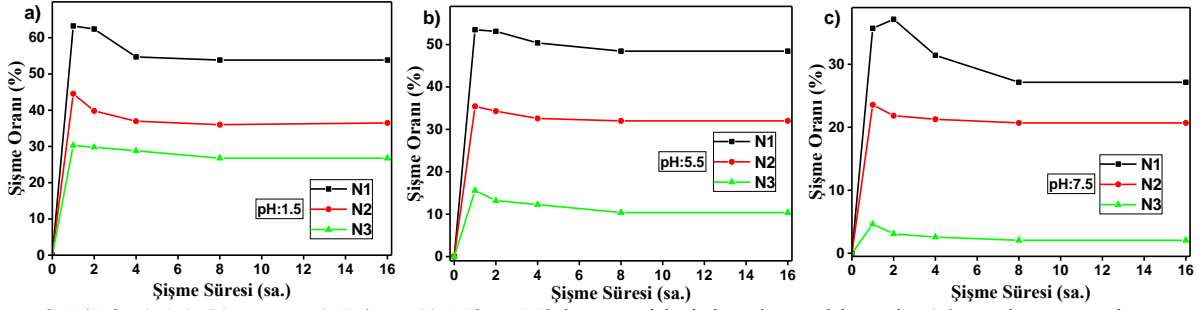
Tablo 2'de N1,N2 ve N3 için farklı pH'larda maksimum şişme ve denge şişme oranları verilmiştir.



**Tablo 2.** N1,N2 ve N3 için pH 3.0, 5.5 ve 7.4'teki maksimum şişme ve denge şişme oranları

pH	Maks. Şişme Oranı (%)			Denge Şişme Oranı (%)		
	3.0	5.5	7.4	3.0	5.5	7.4
N1	63	53	35	54	48	27
N2	45	35	23	37	32	21
N3	30	15	4	27	10	2

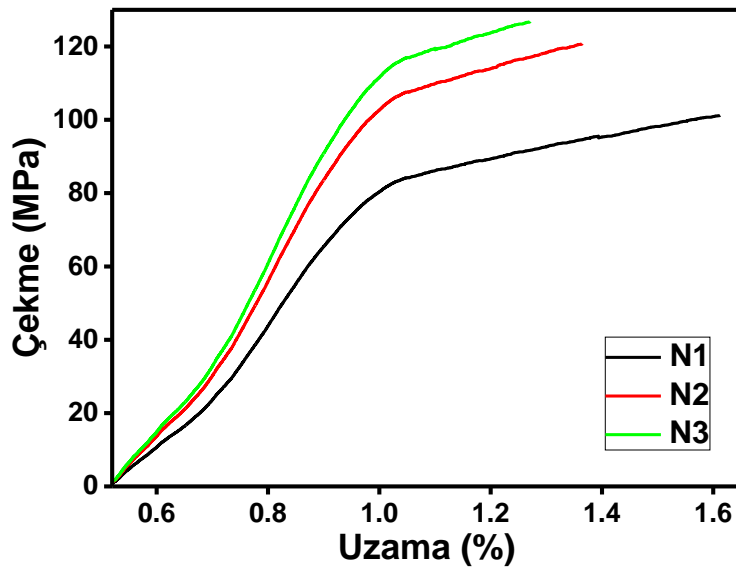
Çapraz bağlanma reaksiyonu asidik ortamda şişme oranının artmasına sebep olan serbest NH<sub>2</sub> gruplarının azalmasına ve tüm pH değerlerinde şişme oranının azalmasına sebep olur [30][31]. Artan çapraz bağlanma oranı (artan GA miktarı) ile pH 3.0, 5.5 ve 7.4'teki şişme davranışlarındaki değişim sırasıyla Şekil 5-a,b,c'de gösterilmiştir. Malzemeler arasındaki bağlar ve etkileşimler kompozitin absorpsiyon kapasitesi konusunda önemli rol oynar. Çapraz bağlanma derecesi kompozit ağırlık bütünlüğü ve gücünü etkiler, çözülmeye engel olur ve kompozitin higroskopik özelliğini ve şişme oranını düşürür [32]. Şekil 4-a'da görülen pH 3.0'te artan çapraz bağlanma oranı ile şişme oranının azalması eğilimi pH 5.5 (Şekil 4-b) ve pH 7.4'te de (Şekil 4-c) görülmektedir.



**Şekil 4.** a) 3.0, b) 5.5 ve c) 7.4'te N1, N2 ve N3 kompozitlerinin oda sıcaklığında, 16 saat boyunca şişme oranlarının karşılaştırılması

### 3.4 Mekanik Özellikler

Kitosanın deasetilasyon derecesi, pH çözeltisi, kurutma profili, karıştırma prosedürü ve çapraz bağlayıcı gibi hazırlanan kompozitin mekanik özelliklerini etkileyen birçok parametre vardır. Şekil 5'de N1,N2 ve N3 kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerinde çapraz bağlayıcı oranının etkisi gösterilmiştir. Çapraz bağlanma oranı arttıkça çekme dayanımının arttığı ancak çekme uzamasının azaldığı gözlenmiştir.



**Şekil 5.** N1, N2 v N3 kompozitinin çekme-uzama grafiği; oda sıcaklığında 1mm/s çekme hızında

Tablo 3'te farklı oranlardaki GA ile hazırlanan C/S/G kompozitlerinin mekanik özellikleri özetlenmiştir. Çapraz bağlanma oranının artmasıyla Elastisite Modülü (Young Modülü, E-Modülü) artarken bu artış oranı çapraz bağlayıcı miktarı ile orantılı değildir. N2 ( $30.16 \pm 1.02$ ) kompozitinin E-Modülü N1'e ( $22.34 \pm 1.15$ ) göre artarken N3 ( $29.06 \pm 1.87$ ) yaklaşık olarak aynıdır. Çapraz bağlayıcı miktarı belli bir noktadan sonra mekanik özellikleri daha az etkiler.

**Tablo 3.** C/S/G kompozitlerinin mekanik özellikleri

Kompozit	E- Modülü (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Akma Uzaması (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Maksimum Uzama (%)
N1	$22.34 \pm 1.15$	$79.18 \pm 6.05$	$0.99 \pm 0.08$	$100.96 \pm 25.23$	$1.62 \pm 0.25$
N2	$30.16 \pm 1.02$	$104.87 \pm 9.65$	$1.02 \pm 0.18$	$121.14 \pm 15.46$	$1.36 \pm 0.55$
N3	$29.06 \pm 1.87$	$115.29 \pm 11.22$	$1.03 \pm 0.14$	$126.69 \pm 19.86$	$1.27 \pm 0.68$

#### 4. Sonuçlar

Sentetik polimerlerin doğada bozunmaması ve çevreye verdiği zararlar ucuz, sürdürülebilir, çevre dostu, biyobozunur doğal polimer malzemelere olan ilgiyi arttırmıştır. S ve C sentetik polimerlere göre birçok üstün özellikleri olan, doğada en çok bulunan, ucuz biyopolimer malzemelerdir. C'nin fonksiyonel grupları, S'nin iyi mekanik özelliği, grafenin iletkenliği ve geniş yüzey alanı gibi özellikleri yardımıyla bu üç malzemeden fonksiyonel ve iletken bir kompozit malzeme üretilmesi hedeflenmiştir. Tek adımda, ucuz, pratik çapraz bağlayıcı ile çözültide karıştırma metodu kullanılarak üretilen C/S/G kompozitlerinin şişme davranışları araştırılmıştır. S'de bulunmayan fonksiyonel NH<sub>2</sub> gruplarının kompozite ait FT-IR spektrumunda var olması bileşenlerin bir biri içerisinde iyi bir biçimde dağıldığını ve aralarındaki sinerjik etki, -OH ve -NH bağları sebebiyle güçlü bir etkileşim olduğunu göstermektedir. FESEM analizi de FT-IR sonuçlarını onaylamakta ve bununla paralel olarak üç bileşenin kompozit yapısındaki iyi dağılımını ve bunlar arasındaki etkileşimler sebebiyle kompozit ağının yeniden yapılandığını göstermektedir. Çapraz bağlanmanın kompozitin sıvı absorplama yeteneğini azalttığı ve çapraz bağlayıcı oranı arttıkça şişme oranının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca artan pH oranının da şişme oranını düşürdüğü belirlenmiştir. Artan çapraz bağlayıcı oranı ile birlikte kompozitin mekanik dayanımının arttığı ancak bu artışın çapraz bağlayıcı artışı ile orantılı olmadığı tespit edilmiştir. Yani üretilen kompozitlerin mekanik dayanımı % 1,5'lük çapraz bağlayıcı oranına kadar hızla artmış ancak bu orandan sonra kompozitteki çapraz bağlayıcı oranı artırıldığı halde mekanik dayanım artış oranının azaldığı gözlenmiştir. Hazırlanan bu üçlü kompozit su arıtma işlemleri, ilaç taşıma sistemleri, sensör uygulamaları, doku mühendisliği vb. birçok alanda kullanılabilir.

#### Kaynaklar

- [1] M.N. Alam, L.P. Christopher, Natural Cellulose-Chitosan Cross-Linked Superabsorbent Hydrogels with Superior Swelling Properties, ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 6 (2018) 8736–8742. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01062>.
- [2] M. Ety, S.D. Auria, S. Shankar, S. Salmieri, J. Coutu, New immobilization method of anti-PepD monoclonal antibodies for the detection of Listeria monocytogenes p60 protein – Part A : Optimization of a crosslinked film support based on chitosan and cellulose nanocrystals ( CNC ), Reactive and Functional Polymers. 146 (2020) 104313. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2019.06.021>.
- [3] S. Omid, M. Pirhayati, A. Kakanejadifard, Co-delivery of doxorubicin and curcumin by a pH-sensitive , injectable , and in situ hydrogel composed of chitosan , graphene , and cellulose nanowhisiker, Carbohydrate Polymers. 231 (2020) 115745. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115745>.
- [4] E.A. Hassan, M.L. Hassan, R.E. Abou-zeid, N.A. El-wakil, Novel nanofibrillated cellulose / chitosan nanoparticles nanocomposites films and their use for paper coating, Industrial Crops & Products. 93 (2016) 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.006>.
- [5] M.F. Mohamed, X. Zhou, H.S. Ibrahim, N.S. Ammar, H.A. Essawy, International Journal of Biological Macromolecules Grafting polymerization of acrylic acid onto chitosan-cellulose hybrid and application of the graft as highly efficient ligand for elimination of water hardness : Validation of high selectivity in prese, International Journal of Biological Macromolecules. 116 (2018) 530–536. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.062>.
- [6] X. Fan, Y. Li, X. Li, Y. Wu, K. Tang, J. Liu, X. Zheng, Injectable antibacterial cellulose nanofiber / chitosan aerogel with rapid shape recovery for noncompressible hemorrhage, International Journal of Biological Macromolecules. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.273>.

- [7] N. Reddy, R. Reddy, Q. Jiang, Crosslinking biopolymers for biomedical applications, *Trends in Biotechnology*. 33 (2015) 362–369. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2015.03.008>.
- [8] O. Yigit, B. Dikici, T.C. Senocak, N. Ozdemir, One-step synthesis of nano-hydroxyapatite/graphene nanosheet hybrid coatings on Ti6Al4V alloys by hydrothermal method and their in-vitro corrosion responses, *Surface and Coatings Technology*. 394 (2020) 125858. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125858>.
- [9] S. Bodur, S. Erarpat, S. Bakırdere, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/reduced graphene oxide nanocomposites based dispersive solid phase microextraction for trace determination of profenofos in white rice flour samples, *Journal of Food Composition and Analysis*. 91 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103516>.
- [10] A.L. Harkins, S. Duri, L.C. Kloth, C.D. Tran, Chitosan-cellulose composite for wound dressing material. Part 2. Antimicrobial activity, blood absorption ability, and biocompatibility, *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*. 102 (2014) 1199–1206. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33103>.
- [11] C. Demitri, V.M. De Benedictis, M. Madaghie, C.E. Corcione, A. Maffezzoli, Nanostructured active chitosan-based films for food packaging applications: Effect of graphene stacks on mechanical properties, *Measurement*. 90 (2016) 418–423. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.012>.
- [12] G. Jena, B. Anandkumar, S.C. Vanithakumari, R.P. George, J. Philip, G. Amarendra, Graphene oxide-chitosan-silver composite coating on Cu-Ni alloy with enhanced anticorrosive and antibacterial properties suitable for marine applications, *Progress in Organic Coatings*. 139 (2020) 105444. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105444>.
- [13] Y.E. Aguirre-Chagala, L.B. Pavón-Pérez, V. Altuzar, J.G. Domínguez-Chávez, S. Muñoz-Aguirre, C. Mendoza-Barrera, Comparative Study of One-Step Cross-Linked Electrospun Chitosan-Based Membranes, *Journal of Nanomaterials*. 2017 (2017) 1980714. <https://doi.org/10.1155/2017/1980714>.
- [14] Z. Zhong, J. Qin, J. Ma, Cellulose acetate/hydroxyapatite/chitosan coatings for improved corrosion resistance and bioactivity, *Materials Science and Engineering: C*. 49 (2015) 251–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.01.020>.
- [15] N. Latifi, M. Asgari, H. Vali, L. Mongeau, A tissue-mimetic nano-fibrillar hybrid injectable hydrogel for potential soft tissue engineering applications, *Scientific Reports*. 8 (2018) 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18523-3>.
- [16] M. Alavi, A. Nokhodchi, An overview on antimicrobial and wound healing properties of ZnO nanobiofilms, hydrogels, and bionanocomposites based on cellulose, chitosan, and alginate polymers, *Carbohydrate Polymers*. 227 (2020) 115349. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115349>.
- [17] L. Zhao, S. Yang, A. Yilihamu, Q. Ma, M. Shi, B. Ouyang, Q. Zhang, X. Guan, S.T. Yang, Adsorptive decontamination of Cu<sup>2+</sup>-contaminated water and soil by carboxylated graphene oxide/chitosan/cellulose composite beads, *Environmental Research*. 179 (2019) 108779. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108779>.
- [18] Shahid-ul-Islam, B.S. Butola, A. Kumar, Green chemistry based in-situ synthesis of silver nanoparticles for multifunctional finishing of chitosan polysaccharide modified cellulosic textile substrate, *International Journal of Biological Macromolecules*. 152 (2020) 1135–1145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.202>.
- [19] R. Ayranci, G. Başkaya, M. Güzel, S. Bozkurt, F. Şen, M. Ak, Carbon Based Nanomaterials for High Performance Optoelectrochemical Systems, *ChemistrySelect*. 2 (2017) 1548–1555. <https://doi.org/10.1002/slct.201601632>.
- [20] J. Phiri, P. Gane, T.C. Maloney, General overview of graphene: Production, properties and application in polymer composites, *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 215 (2017) 9–28. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2016.10.004>.
- [21] H. İncebay, Z. Yazıcıgil, Effect of different copper salts on the electrochemical determination of Cu(II) by the application of the graphene oxide-modified glassy carbon electrode, *Surfaces and Interfaces*. 9 (2017) 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.09.004>.
- [22] B.C. Ozkan, T. Soganci, H. Turhan, M. Ak, Investigation of rGO and chitosan effects on optical and electrical properties of the conductive polymers for advanced applications, *Electrochimica Acta*. 295 (2019) 1044–1051. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.11.032>.
- [23] T. Huang, Y.W. Shao, Q. Zhang, Y.F. Deng, Z.X. Liang, F.Z. Guo, P.C. Li, Y. Wang, Chitosan-Cross-Linked Graphene Oxide/Carboxymethyl Cellulose Aerogel Globules with High Structure Stability in Liquid and Extremely High Adsorption Ability, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 7 (2019) 8775–8788. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00691>.
- [24] E.A. El-Hefian, M.M. Nasef, A.H. Yahaya, The preparation and characterization of Chitosan / Poly (Vinyl Alcohol) blended films, *E-Journal of Chemistry*. 7 (2010) 1212–1219. <https://doi.org/10.1155/2010/626235>.
- [25] M. Muthuchamy, R. Govindan, K. Shine, V. Thangasamy, N.S. Alharbi, M. Thillaichidambaram, J.M. Khaled, J.L. Wen, K.F. Alanzi, Anti-biofilm investigation of graphene/chitosan nanocomposites against biofilm producing *P. aeruginosa* and *K. pneumoniae*, *Carbohydrate Polymers*. 230 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115646>.
- [26] L. Yan, W. Chen, Preparation of chitosan / graphene oxide composite film with enhanced mechanical strength in the wet state, *Carbohydrate Polymers*. 83 (2011) 653–658. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.038>.
- [27] C. Rodríguez-González, A.L. Martínez-Hernández, V.M. Castañó, O. V. Kharissova, R.S. Ruoff, C. Velasco-Santos, Polysaccharide nanocomposites reinforced with graphene oxide and keratin-grafted graphene oxide, *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 51 (2020) 3619–3629. <https://doi.org/10.1021/ie200742x>.
- [28] A.R. Karimi, M. Tarighatjoo, G. Nikravesh, 1,3,5-Triazine-2,4,6-tribenzaldehyde derivative as a new crosslinking agent for synthesis of pH-thermo dual responsive chitosan hydrogels and their nanocomposites: Swelling properties and drug release behavior, *International Journal of Biological Macromolecules*. 105 (2017) 1088–1095.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.07.128>.
- [29] R. Wang, D. Shou, O. Lv, Y. Kong, L. Deng, J. Shen, pH-Controlled drug delivery with hybrid aerogel of chitosan, carboxymethyl cellulose and graphene oxide as the carrier, *International Journal of Biological Macromolecules*. 103 (2017) 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.05.064>.
- [30] I.M. Garnica-Palafox, F.M. Sánchez-Arévalo, Influence of natural and synthetic crosslinking reagents on the structural and mechanical properties of chitosan-based hybrid hydrogels, *Carbohydrate Polymers*. 151 (2016) 1073–1081. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.036>.
- [31] O. Guaresti, C. García-Astrain, T. Palomares, A. Alonso-Varona, A. Eceiza, N. Gabilondo, Synthesis and characterization of a biocompatible chitosan-based hydrogel cross-linked via ‘click’ chemistry for controlled drug release, *International Journal of Biological Macromolecules*. 102 (2017) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.04.003>.
- [32] T.H. Mokhothu, M.J. John, Review on hygroscopic aging of cellulose fibres and their biocomposites, *Carbohydrate Polymers*. 131 (2015) 337–354. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.06.027>.



## İki Farklı Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) Plastik Atığın Bitüm Modifikasyonunda Kullanımı

İremgöl Bektaş<sup>1</sup>, Erkut YALÇIN<sup>1\*</sup>, Özge Erdoğan YAMAÇ<sup>1</sup>, Mehmet YILMAZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> erkutyalcin@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 25/01/2021;

Kabul/Accepted: 15/02/2021)

**Özet:** Bu çalışmada, en önemli çevresel sorunlardan birini çözmek ve düşük maliyetli malzemelerle bitüm performans özelliklerini geliştirmek için atık plastiklerden olan düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan 2 farklı LDPE 4 farklı oranda (%1, %2, %3 ve %4) ilave edilerek modifiye bitümler hazırlanmıştır. Saf ve modifiye bitümlere penetrasyon, yumuşama noktası, iki farklı sıcaklıkta (135°C ve 165°C) dönel viskozite deneyleri uygulanmıştır. LDPE katkılarının kullanılması ile saf bağlayıcıya göre penetrasyon değerlerinin azaldığı, yumuşama noktası ve viskozite değerlerinin ise arttığı tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda LDPE-A (L1) katkısının LDPE-B (L2) katkısına göre daha olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. L1 modifiyeli bitümlerin L2 modifiyeli bitümlere göre daha düşük penetrasyon değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca L1 bağlayıcısının L2 bağlayıcısına göre tüm katkı içeriklerinde daha yüksek viskozite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı içeriği arttıkça viskozite değerleri de artmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Bitüm, Modifikasyon, LDPE, Dönel Viskozimetre

### The Use of Two Different Low Density Polyethylene (LDPE) Plastic Wastes in Bitumen Modification

**Abstract:** In this study, low density polyethylene (LDPE) was used in waste plastics to solve one of the most important environmental problems and to improve bitumen performance properties with low cost materials. Modified bitumens were prepared by adding 2 different LDPE' used in the study in 4 different proportions (1%, 2%, 3% and 4%). Penetration, softening point and rotational viscosity tests at two different temperatures (135°C and 165°C) were applied to pure and modified bitumens. Using LDPE additives, it was determined that the penetration values decreased, the softening point and viscosity values increased compared to the pure binder. As a result of the analysis, it was determined that the LDPE-A (L1) contribution gave more positive results than the LDPE-B (L2) contribution. It was determined that L1 modified bitumen has a lower penetration value than L2 modified bitumen. In addition, it was determined that L1 binder has higher viscosity values in all additive contents compared to L2 binder. As the additive content increases, the viscosity values also increase.

**Key words:** Bitumen, Modification, LDPE, Rotational Viscometer

### 1. Giriş

Çevre sorunlarının en önemlilerinden biri, yeryüzünde her geçen gün artan atık maddelerdir. Atık maddelerden biri olan plastik atığı, tüm dünyada son derece önemli bir sorun haline gelmiştir. Plastik atıklarının en büyük payını ambalaj atıkları oluşturmaktadır [1]. Avustralya'da yapılan bir Plastik Geri Dönüşüm Anketi, 2016-2017 yıllarında toplam plastik tüketiminin 3.513.100 ton olduğunu ve yalnızca 415.200 tonun geri dönüştürüldüğünü ortaya koymuştur [2]. Çin'deki plastik üretimi ve kullanımının, son yıllarda yılda 30 milyon tonun üzerinde atık plastiğe yol açtığı belirlenmiştir [3]. 2010 yılında 192 kıyı ülkesinde 275 milyon ton plastik atık üretildiği ve bunlardan 4,8 ila 12,7 milyon tonun okyanusa karıştığı tahmin edilmektedir [4]. Avrupa Birliği'nde plastik atık yönetimi gelişmesine rağmen, plastik atıkların çoğu (%41'i) yakılmaya gönderilmekte ve plastik atıkların yaklaşık %30'u geri dönüştürülmektedir [5]. Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na (EPA) göre, ABD'de 2017 yılında 35.370 ton plastik üretildi, bunun sadece %8,4'ü (2960 tonu) geri dönüştürüldü ve %75,8'i (26.820 tonu) ise gömüldü (Çevre Koruma Ajansı (EPA)). Düzenli depolama alanlarından toplanan sızıntı suyu örneklerinden 10 ile 100 mm arasında mikroplastiklerin mevcut olduğu tespit edildiğinden atık plastik malzemeler çevreyi ve halk sağlığını tehdit etmektedir [6]. Bu, depolama sahasının plastiklerin nihai çukuru olmadığını, ancak içme suyu kalitesine ve diğer su kaynaklarına tehdit oluşturan potansiyel bir mikro plastik kaynağı olduğunu göstermektedir. Hwang ve arkadaşları, polipropilen mikroplastik partiküllerin hücrelerle

\* Sorumlu yazar: [erkutyalcin@firat.edu.tr](mailto:erkutyalcin@firat.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4933-8574, <sup>1</sup> 0000-0002-6389-4211, <sup>1</sup> 0000-0003-0535-891X, <sup>1</sup> 0000-0002- 2761-2598

doğrudan temasının, hücrelere doğrudan toksisite yerine bağışıklık hücrelerinden sitokin üretimini indükleyerek sağlık sorunlarına neden olma potansiyeline sahip olabileceğini belirlemiştir [7].

Atık plastik, son birkaç yıldır çok dikkat çeken malzemelerden biridir [8, 9]. Bununla birlikte, ABD'deki atık plastik geri dönüşüm oranı, geri dönüşüm oranlarını %30 ile %60 arasında bildiren diğer ülkelerin çok altındadır. Japonya ise %78 ile en yüksek geri dönüşüm oranına sahiptir [10]. Plastik atık karışımlar karmaşık yapısı ve verimsiz mekanik geri dönüşümü nedeniyle geri dönüştürülmesi zor malzemelerdir. Avustralya, gelişmekte olan ülkelere atık göndermek yerine, Avustralya'nın atık üretimine önemli bir katkıda bulunan geri dönüştürülmüş plastik kullanma alternatifini geliştirmek için proaktif adımlar atmaktadır [2]. Ayrıca ABD'de de atık plastikleri kullanmak için yeni alternatifler aranmaktadır. Çin ve Hindistan'da ise atık plastiklerin ithal edilmesi yasaklanmıştır [11].

Plastik kullanımının azaltılması, doğrudan atık plastiği azaltmanın en iyi yolu olabilir. Örneğin, tek kullanımlık plastikleri yasaklayarak sıfır atığa doğru ilerlemek için bir perspektif önerilmiştir [12]. Bu yasağın yerine getirilmesi ve uygulanması zor olabilir, bu nedenle plastik atık sorununu azaltmak için başka seçenekler aranmalıdır. Araştırmacılar ve mühendisler, atık plastik malzemeleri değerlendirerek inşaat altyapılarında kullanılacak ahşap plastik kompozitler [13], beton bloklar [14] ve harçlar [15, 16] üretmek için çalışmalar yapmaktadır. Ramli ve Tabassi yapmış olduğu çalışmada, polimer modifiyeli harçların geleneksel harç karışımlarından daha iyi mühendislik özellikleri sergilediğini bulmuşlardır [17]. Arulrajah ve arkadaşları plastik granüllerin, temel dolgu malzemesi olarak kullanılan ezilmiş tuğla ve geri kazanılmış asfalt kaplama (RAP) atıkları ile birlikte kullanılma olasılığını araştırmıştır [18].

Bitümlü kaplamalarda atık malzemelerden yararlanmak son yıllarda büyük önem arz eden çevreci bir yaklaşımdır. Bitüm, kaplamada en çok kullanılan bağlayıcıdır ve yenilenemeyen bir kaynak olan petrolden elde edilir [9]. Bir yandan araştırmacılar çevreci çalışmalar kapsamında atık motor yağı, yemeklik yağ, domuz gübresi ve kahve telvesi gibi çeşitli atıklardan faydalanmaktadır. Bu durum da şüphesiz zararlı çevresel etkileri ve işlenmemiş malzeme tüketimini azaltabilir. Öte yandan mühendisler, geri dönüştürülmüş malzemeler içeren bu tür kaplama altyapısının performanslarının geri dönüştürülmüş malzeme içermeyenler kadar iyi olduğu kanıtlanmadıkça, büyük miktarda geri dönüştürülmüş malzeme kullanımını savunmakta tereddüt etmektedir. Yollarda çeşitli atık polimerlerin kullanımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır [19, 20]. Bununla birlikte literatürde, çeşitli dozajlarda ve tiplerde geri dönüştürülmüş plastikler içeren asfalt kaplamaların performansını tam olarak anlamada boşluk vardır.

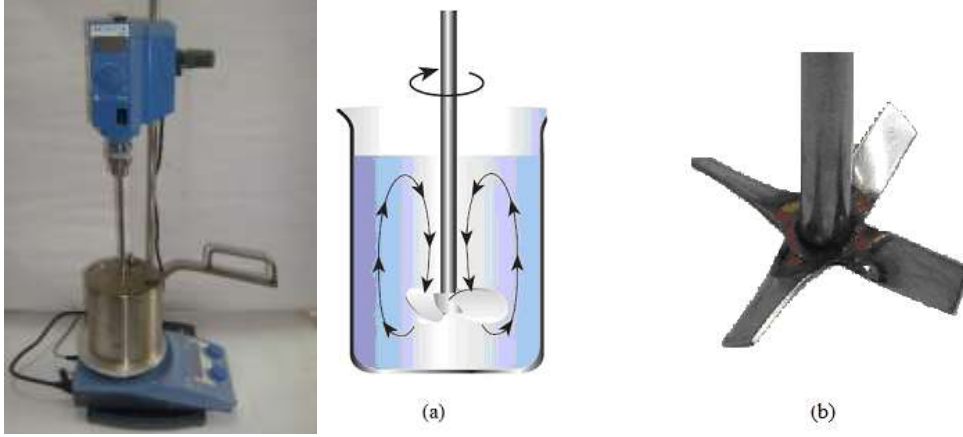
Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), yüksek sıcaklıkta tekerlek izi direncini iyileştirmek ve sıcaklık duyarlılığını önemli ölçüde azaltmak için genellikle bitüm modifikasyonunda kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bitüm modifikasyonunda iki farklı kimyasal içeriğe sahip düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) kullanılmasının bitümlü bağlayıcıların fiziksel özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. İki farklı LDPE bağlayıcı 4 farklı (%1, %2, %3 ve %4) oranda saf bitüme eklenmiştir. Saf ve modifiye bitüme penetrasyon, yumuşama noktası ve dönel viskozite deneyleri uygulanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Çalışmada saf bağlayıcı olarak TÜPRAŞ Batman rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı bitüm kullanılmıştır. Saf bağlayıcı iki farklı fiziksel özelliklere sahip LDPE katkısı ile modifiye edilmiştir. Çalışmada kullanılan düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) Adanus Plastik şirketinden temin edilmiştir. Bu çalışmada 2 farklı kimyasal bileşene sahip LDPE 4 farklı oranda (%1, %2, %3 ve %4) saf bitüme ilave edilerek hedef bağlayıcılar hazırlanmıştır. LDPE katkılı bitüm hazırlama işlemi aşağıdaki sıralamaya göre yapılmıştır.

- İlk önce saf bitüm  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'deki etüvde 30 dakika ısıtılarak akışkan hale getirildi.
- Akışkan hale getirilen bitüm 500 gram olacak şekilde karıştırıcının metal haznesine döküldü.
- Homojen ısıl kaynağı oluşturmak için metal hazneye dökülen bitümün  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$  koşullandırılan ısıtıcı kaynağı üzerindeki ısıl gömleğin içerisine bırakıldıktan sonra ısıtıcı  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$  ısıl dengesini sağlayana kadar bekletildi.
- LDPE, bitümün ağırlığına belirlenen yüzdelerde sıcak bitümün içerisine döküldü.

LDPE içeren bitümler, 60 dakika boyunca 1000 devir/dakika hızla çalışan mekanik karıştırıcı ile karıştırılarak hazırlanmıştır [20] (Şekil 1). Saf ve LDPE içeren bağlayıcıların çalışmada kullanılan kısaltmaları Tablo 1'de verilmiştir. LDPE katkılarının fiziksel özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar tipi karıştırma cihazı; (a) karıştırma etkisi ve (b) dört bıçaklı karıştırıcı

Tablo 1. Çalışmada bitümlü bağlayıcılar için kullanılan kısaltmalar

Katki Adı	Düşük Yoğunluklu Polietilen Katkı İçeriği (%)				
	0	1	2	3	4
Düşük yoğunluklu polietilen A (L1)	Saf	L1-1	L1-2	L1-3	L1-4
Düşük yoğunluklu polietilen B (L2)		L2-1	L2-2	L2-3	L2-4

Tablo 2. LDPE katkılarının fiziksel özellikleri

Özellikler	L1	L2
Özgül ağırlığı (g/cm <sup>3</sup> )	0,913	0,916
Gerilme kuvveti (MPa)	20	15
Erime sıcaklığı (°C)	120	130
Darbe dayanımı (kJ/m <sup>2</sup> )	5	5

## 2.1. Penetrasyon Testi

Penetrasyon deneyi ile bitümün sertliği veya kıvamı tespit edilmektedir. Penetrasyonun kelime anlamı, batma veya içe girme demektir. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde dikey olarak kat ettiği mesafe olarak tanımlanmaktadır [21]. Numune üzerinde kabın kenarına ve birbirine 1 cm'den daha yakın olmayan noktalardan en az 3 deneme alınır ve kabul edilebilir ölçümlerin aritmetik ortalaması numunenin penetrasyon değeri olarak kabul edilir. Penetrasyonun birimi 10<sup>-1</sup> mm'dir. Bitümün penetrasyon değeri kıvamla ters orantılıdır, penetrasyon yükseldikçe bitüm yumuşamaktadır. Bitümün kıvamı arttıkça karışım içerisindeki agregaları birbirine daha kuvvetli şekilde bağlamaktadır.

## 2.2. Yumuşama Noktası Testi

Bitümün yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla yapılan bir deneydir. Bu deneyde, bitüm doldurulmuş standart halka düzeneğe yerleştirilmekte ve bitüm üzerine 2,5 cm yükseklikten standart bir bilye bırakılmaktadır. Deney başlangıç sıcaklığı 5°C'dir ve deney boyunca sıcaklık dakikada 5°C arttırılmaktadır. Yumuşama noktası değeri, bitümlü malzemenin tabana değdiği anda termometrenin gösterdiği değerdir [22]. Yumuşama noktası yüksek bağlayıcının kullanıldığı karışımlarda tekerlek etkisiyle oluşan deformasyonların daha az olduğu görülmektedir. Tekerlek izine hassas karışımlar için yumuşama noktası sıcaklığının tekerlek iziyle iyi bir korelasyon sağladığı ve yumuşama noktasındaki 5-6°C'lik bir azalmanın %20 daha fazla tekerlek izine yol açtığı bilinmektedir.

## 2.3. Dönel Viskozite Testi

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Bu amaçla AASHTO T316 standardına uygun olarak "Brookfield

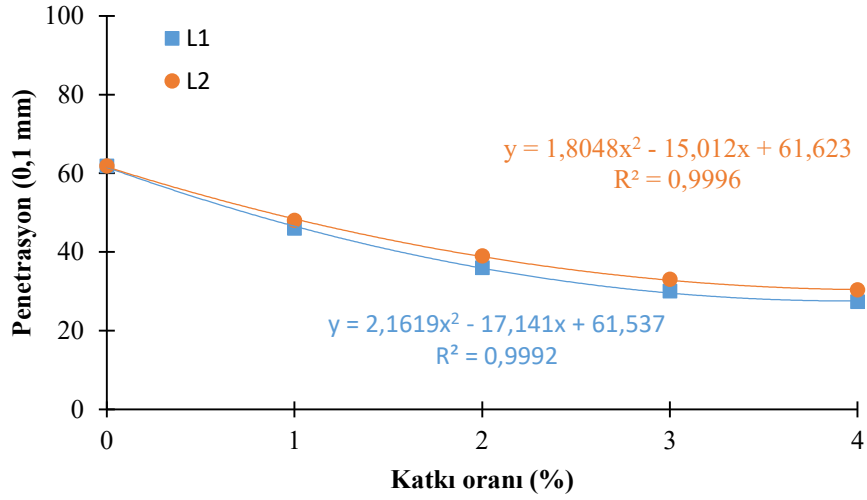


Viskozimetresi” kullanılmaktadır [23]. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. Deneyle bir motor yardımıyla milin düzenli olarak 20 devir/dakika hızla dönmesi sağlanmakta ve viskozite okumaları yapılmaktadır. Genellikle orijinal bağlayıcılar üzerinde uygulanan RV deneyinde 135°C’deki viskozite değerinin 3 Pa.s’yi aşmaması istenir. Bitümlü bağlayıcıların viskozite değerleri ASTM D4402 standardına göre belirlenmiştir.

### 3. Deneysel Sonuçlar

#### 3.1. Penetrasyon Deney Sonuçları

Saf ve modifiye edilmiş bağlayıcılara uygulanan penetrasyon deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir.

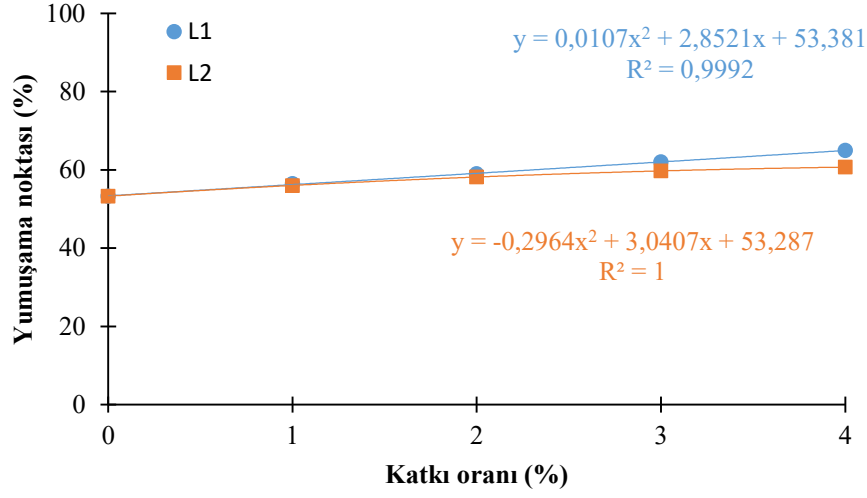


Şekil 2. Penetrasyon değerlerindeki değişiklik

L1 ve L2 modifiyeli bitümlerin penetrasyon değerleri, katkı içeriğinin artmasıyla polinom olarak azalmaktadır. L1-4 ve L2-4 bağlayıcılarının saf bağlayıcıya kıyasla penetrasyon değerinde önemli bir azalma görülmemiştir. L1 modifiyeli bitüm, L2 modifiyeli bitüm ile yakın penetrasyon değerlerine sahiptir. Ancak bu iki modifiyeli bitümden L1 modifiyeli bitüm daha düşük penetrasyon değerine sahiptirler. L1-4 ve L2-4 modifiye bağlayıcılarının penetrasyon değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %55,8 ve %51 azalmıştır. L1-1 ve L2-1 modifiye bağlayıcılarının penetrasyon değerleri ise saf bağlayıcıya göre sırasıyla %25,6 ve %22,3 azalmıştır.

#### 3.2. Yumuşama Noktası Deney Sonuçları

Saf ve modifiye bitümlü bağlayıcılara uygulanan yumuşama noktası deneylerinden elde edilen sonuçlar, Şekil 3’te verilmiştir. Yumuşama noktası değerleri ile L1 ve L2 içeriği arasında doğrusal bir ilişki vardır. %1 ve %2 katkı içeriğinde hem L1 hem de L2 modifikasyonu yaklaşık benzer yumuşama noktası değerleri vermektedir. %3 ve %4 katkı içeriklerinde L1 ve L2 modifikasyonlarının yumuşama noktası değerleri farklılık göstermektedir. L1 katkısının bitüme %1, %2, %3 ve %4 oranlarında ilave edilmesi ile yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %5,9; %10,7; %16,3 ve %20,5 oranlarında artmıştır. L2 katkısının bitüme %1, %2, %3 ve %4 oranlarında ilave edilmesi ile yumuşama noktası değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla %5,1; %9,2; %12,2 ve %13,9 oranlarında artmıştır. L1 modifikasyonunda yumuşama noktasındaki değişiklik L2 modifikasyonundan daha belirgindir. Her iki katkı maddesinin de kullanıldığı sıcak karışım asfaltın yüksek sıcaklık direncine katkıda bulunabileceği açıktır. Ancak, kalıcı deformasyon açısından L1 modifikasyonu ile aynı performansını sağlamak için L2 katkısının L1 katkisinden daha yüksek oranlarda kullanılması gerekmektedir.



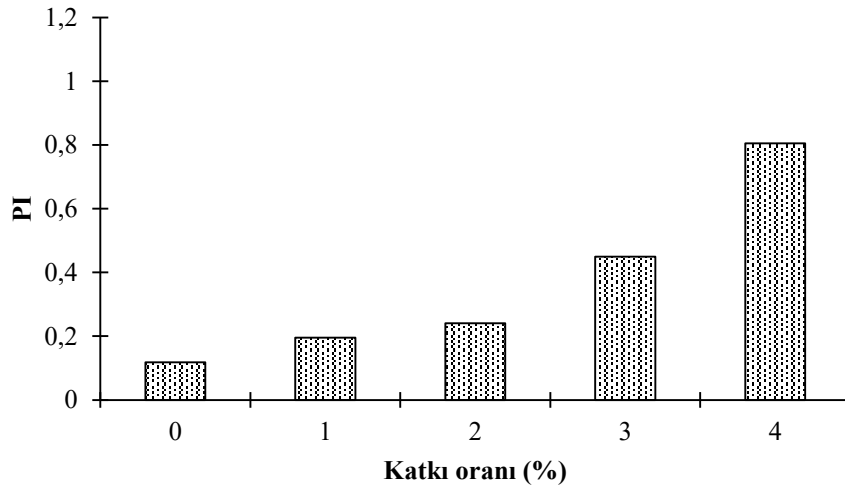
Şekil 3. Yumuşama noktası değerlerindeki değişiklik

Penetrasyon ve yumuşama noktası deneyleri, bağlayıcının kıvamını belirlemekte ve sınıflandırılmasını sağlamaktadır. Bitümlü bağlayıcılar termoplastik olduğundan, düşük sıcaklıklarda sert, yüksek sıcaklıklarda ise daha yumuşak özellik göstermektedir. Bu özellik ısıya duyarlılık olarak bilinir ve bağlayıcının en önemli özelliklerinden biridir. Penetrasyon ve yumuşama noktası değerleri kullanılarak ısıya karşı hassasiyeti ifade eden penetrasyon indeksi (PI) değerleri Denklem 1 ve 2 kullanılarak hesaplanmıştır [2]. Belirli bir bitümün penetrasyon indeksini bilmek, bir uygulamadaki davranışını tahmin etmeyi sağlar.

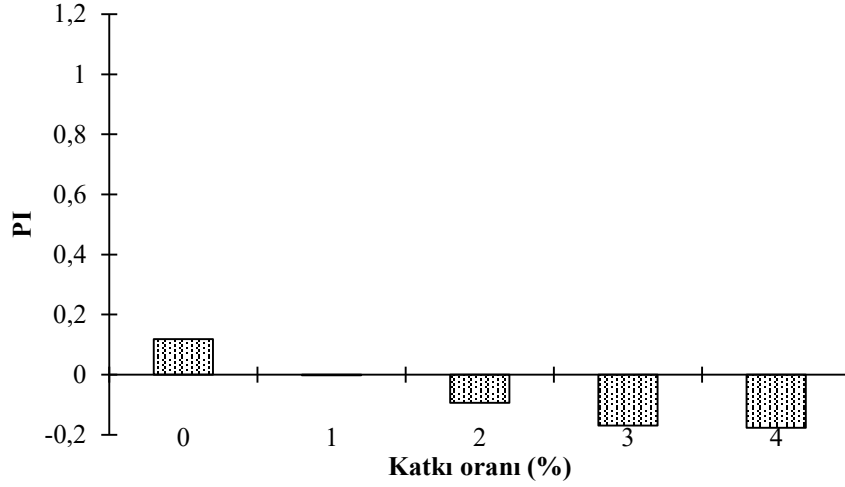
$$A = (\log P_{25} - \log 800) / (25 - T_{YN}) \quad (1)$$

$$PI = (20 - 500A) / (1 + 50A) \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'de  $P_{25}$ , 25°C sıcaklıkta yapılan standart penetrasyon değerini,  $T_{YN}$  ise yumuşama noktası (halka bilye metodu) değerini ifade etmektedir. PI değeri ile ısıya karşı hassasiyet arasında ters orantı bulunmaktadır. PI değeri arttıkça ısıya karşı hassasiyet azalmaktadır. Bağlayıcıların PI değerleri Şekil 4'te ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. L1 bağlayıcısının PI değerleri

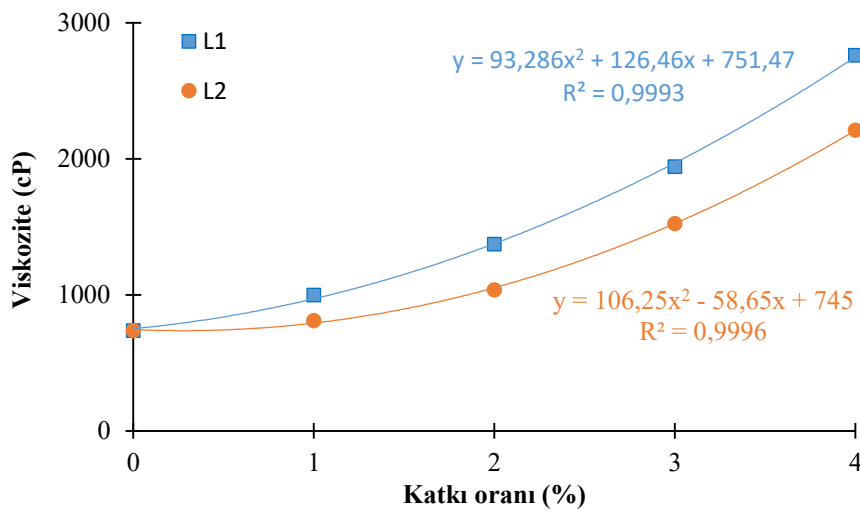


Şekil 5. L2 bağlayıcısının PI değerleri

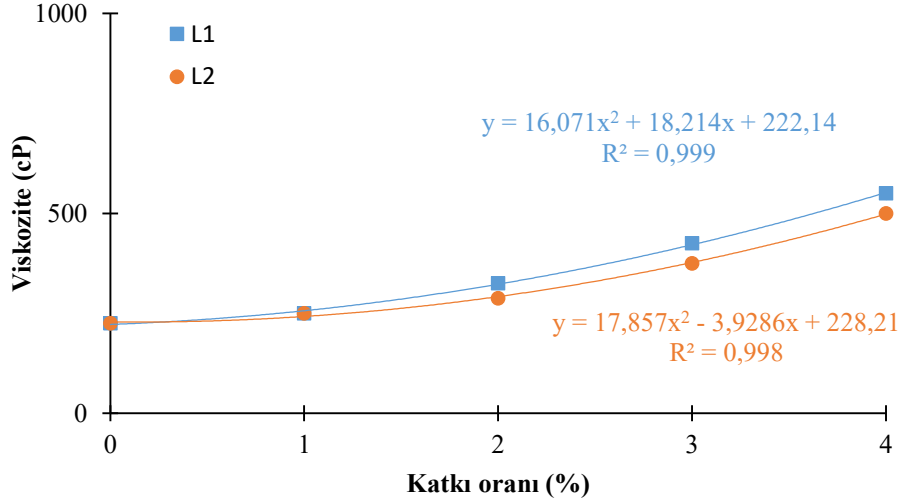
L1-4 bağlayıcısı en yüksek PI değerini vermektedir. L1 katkı içeriği arttıkça PI değerleri de artmaktadır. %3 ve %4 katkı içeriklerinde PI değerinde önemli bir artış gözlenmektedir. L1 katkısının bitüme %1, %2, %3 ve %4 oranlarında ilave edilmesi ile PI değerleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1,65; 2,03; 3,79 ve 6,79 kat artmıştır. L1 katkısının ısıya duyarlılık üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı görülmektedir. L1 modifikasyonunun bütün katkı içeriklerinde PI değerleri +1 değerinin üzerine çıkmamaktadır. En düşük PI değerini ise %4 katkı içeriğine sahip L2 modifiyeli bitüm vermektedir. L2 modifikasyonunun PI değerleri -1 değerinin üzerine çıkmaktadır. Katkı içeriği arttıkça L2 modifikasyonunun PI değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Isıya karşı bağlayıcıların hassasiyetini ifade eden PI değerlerinden, bağlayıcı sertliği arttıkça PI değerinin de arttığı dolayısıyla ısıya karşı hassasiyetin azaldığı belirlenmiştir.

### 6.1.3. Dönel Viskozimetre Deneyi

135°C ve 165°C'deki saf ve modifiye edilmiş bağlayıcıların viskoziteleri üzerindeki değişim sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 6. Bağlayıcıların 135°C'deki viskozite değerleri



Şekil 7. Bağlayıcıların 165°C'deki viskozite değerleri

L1 ve L2 modifiye bitümlerinin katkı içeriği arttıkça hem 135°C hem de 165°C sıcaklıktaki viskozite değerlerinde polinom artışı gözlenmektedir. Bununla birlikte, 135°C'de en yüksek L1 içeriğinde bile 3 Pa.s viskozite değerinin aşılmamasından dolayı herhangi bir işlenebilirlik sorunu yoktur. Viskozite eğilimindeki değişimin 135°C ve 165°C için benzer olduğu görülmektedir. Fakat 135°C'ye göre 165°C'de L1 ve L2 modifikasyonlu bağlayıcılar yaklaşık benzer viskozite değerleri vermektedir. 165°C de %1 katkı içeriğinde L1 ve L2 modifikasyonu neredeyse aynı viskozite değerine sahiptir. Ancak %1 katkı içeriğinden sonra katkı içeriği arttıkça L1 ve L2 modifikasyonları daha farklı viskozite değerlerine sahiptir. %1, %2, %3 ve %4 oranlarında L1 modifiye bitümleri, 135°C'deki saf bitüm ile karşılaştırıldığında sırasıyla 1,36; 1,86; 2,64 ve 3,75 kat daha yüksek viskozite değerleri vermektedir. 165°C'de ise sırasıyla saf bağlayıcıya göre 1,11; 1,44; 1,89 ve 2,44 kat daha yüksek viskozite değerleri vermektedir. L1-4 bağlayıcısı en yüksek viskozite değerine sahiptir. %1, %2, %3 ve %4 oranlarında L2 modifiye bitümleri, 135°C'deki saf bitüm ile karşılaştırıldığında ise sırasıyla 1,10; 1,41; 2,07 ve 3,00 kat daha yüksek viskozite değerleri vermektedir. L2 bağlayıcısı 165°C'de ise katkı içeriklerine göre sırasıyla saf bağlayıcıya göre 1,11; 1,28; 1,67 ve 2,22 kat daha yüksek viskozite değerleri vermektedir. L1 modifiye bağlayıcısının L2 modifiye bağlayıcısına göre tüm katkı içeriklerinde daha yüksek viskozite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

#### 4. Sonuç ve Değerlendirme

Çalışmada Batman TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen B 50/70 sınıfı bitüme 4 farklı oranda (%1, %2, %3 ve %4) 2 farklı kimyasal bileşene sahip düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ilave edilerek modifiye bitümler elde edilmiştir. Bağlayıcılar üzerinde penetrasyon, yumuşama noktası ve dönel viskozite deneyleri uygulanarak saf ve modifiye bitümlerin geleneksel özellikleri karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerden aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- L1 ve L2 modifiyeli bitümlerin penetrasyon değerleri, katkı içeriğinin artmasıyla polinom olarak azalmaktadır. L1 ve L2 modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon değerleri birbirlerine yakındır. Fakat L1 modifiyeli bitümler L2 modifiyeli bitümlere göre daha düşük penetrasyon değerine sahiptir. Ayrıca katkı içeriği arttıkça her iki LDPE katkısı için de penetrasyon değerleri azalmaktadır.
- LDPE modifikasyonunun yumuşama noktası değerleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. LDPE içeriğinin artmasıyla yumuşama noktaları istikrarlı bir şekilde artmaktadır. %1 ve %2 katkı içeriğinde hem L1 hem de L2 modifikasyonlu bağlayıcılar yaklaşık benzer yumuşama noktası değeri vermektedir. %2 katkı içeriğinden sonra L1 ve L2 modifikasyonlarının yumuşama noktası değerleri farklılık göstermektedir. İki katkı maddesinin de ilave edildiği sıcak karışım asfaltların yüksek sıcaklık direncine katkıda bulunabileceği açıktır.
- LDPE katkılarının ısı hassasiyetine herhangi bir olumsuz etkisi yoktur. L1 içerikli bağlayıcıların PI değerleri 0 değerinin üzerinde iken L2 içerikli bağlayıcıların PI değerleri 0 değerinin altındadır.

- L1 ve L2 içeriklerinin artmasıyla viskozite değerleri önemli ölçüde artmaktadır. Ancak en yüksek LDPE içeriğinde bile işlenebilirlik sorunu yoktur. L1 modifiyeli bağlayıcıların L2 modifiyeli bağlayıcılara göre tüm katkı içeriklerinde daha yüksek viskozite değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Katkı içeriği arttıkça viskozite değerleri de artmaktadır.

Bu çalışmada, mühendislik performansını, maliyet faydaları ve çevresel etkinin azaltılması açısından asfalt kaplama için çeşitli geri dönüştürülmüş plastiklerin fizibilitesini sistematik bir şekilde birleştirmek, değerlendirmek için bitüm modifikasyonunda LDPE kullanılmıştır.

## Kaynaklar

- [1] Ragaert K, Delva L, Geem KV. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Manag.*, 2017; 69: 24-58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.
- [2] Chin C, Damen P. Viability of Using Recycled Plastics in Asphalt and Sprayed Sealing Applications. Austroads Publication, 2019; No. AP-T351-19.
- [3] Chen Y, Cui Z, Cui X, Liu W, Wang X, Li X, Li S. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2019a; 146: 348e-57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.011>.
- [4] Jambeck J.R, Geyer R, Wilcox C, Siegler T.R, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL. Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*; 2015; 347: 768-771.
- [5] Filho W.L, Saari U, Fedoruk M, Iital A, Moora H, Kloga M, Voronova V. An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe. *J. Clean. Prod.*, 2019; 214: 550-558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.256>.
- [6] He P, Chen L, Shao L, Zhang H, Lu Municipal F. Solid waste (MSW) landfill: a source of microplastics, Evidence of microplastics in landfill leachate. *Water Res*, 2019; 159: 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.060>.
- [7] Hwang J, Choi D, Han S, Choi J, Hong J. An assessment of the toxicity of polypropylene microplastics in human derived cells. *Sci. Total Environ*, 2019; 684: 657-669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.071>.
- [8] Huang Y, Bird R.N, Heidrich O, A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2007; 52 (1): 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>.
- [9] Ingrassia L.P, Lu X, Ferrotti G, Canestrari F. Renewable materials in bituminous binders and mixtures: speculative pretext or reliable opportunity. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2019; 144: 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.034>.
- [10] Khoo H.H. LCA of plastic waste recovery into recycled materials, energy and fuels in Singapore. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2019; 145: 67-77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.010>.
- [11] Cockburn H. India Bans Imports of Waste Plastic to Tackle Environmental Crisis. <https://www.independent.co.uk/environment/india-plastic-waste-banrecycling-uk-china-a8811696>. 2019; html/ (accessed on 20 November 2019).
- [12] Walker T.R, Xanthos D. A call for Canada to move toward zero plastic waste by reducing and recycling single-use plastics. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2018; 133: 99-100. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.014>.
- [13] Keskisaari A, Karki T. The use of waste materials in wood-plastic composites and their impact on the profitability of the product. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2018; 134: 257-261. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.023>.
- [14] Meng Y, Ling T, Mo KH. Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: an overview. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2018; 138: 298-312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.029>.
- [15] Ramli M, Tabassi A.K. Effects of different curing regimes on engineering properties of polymer-modified mortar. *J. Mater. Civ. Eng.*, 2012; 24 (4): 468-478. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000394](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000394).
- [16] Makria C, Hahladakis J.N, Gidaracos E. Use and assessment of "e-plastics" as recycled aggregates in cement mortar. *J. Hazard Mater.*, 2019; 379: 120776. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120776>.
- [17] Arulrajah A, Yaghoobi E, Wong Y.C, Horpibulsuk S. Recycled plastic granules and demolition wastes as construction materials: resilient moduli and strength characteristics. *Construct. Build. Mater.*, 2017; 147: 639-647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.178>.
- [18] Poulidakos et al. Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2017; 116: 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>.
- [19] Sabina K.T.A, Sharma D.K.S, Sharma D.K. Effect of waste polymer modifier on the properties of bituminous concrete mixes. *Construct. Build. Mater.*, 2011; 25(10): 3841-3848. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.003>.
- [20] Shenghua W, Luke M. Repurposing waste plastics into cleaner asphalt pavement materials: A critical literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2021; 280: 124355
- [21] EN 1426. "Bitüm ve Bitümlü Bağlayıcılar-İğne Batma Derinliği Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 2015.
- [22] TS EN-1427, Bitüm ve bitümlü bağlayıcılar-Yumuşama noktası tayini-Halka ve bilye yöntemi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
- [23] AASHTO T 316, Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer, AASHTO, USA, 2019.

## Tel Erozyon Yöntemiyle İşlenmiş Ti 6Al 4V Alaşımının Yüzey Kalitesinin Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemiyle İyileştirilmesi

Mahmut ÇELİK<sup>1\*</sup>, Hakan GÜRÜN<sup>2</sup>, Ulaş ÇAYDAŞ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Uçak Gönde ve Motor Bakımı Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

\*<sup>1</sup> [mahmutcelik@erciyes.edu.tr](mailto:mahmutcelik@erciyes.edu.tr), <sup>2</sup> [hgurun@gazi.edu.tr](mailto:hgurun@gazi.edu.tr), <sup>3</sup> [ucaydas@firat.edu.tr](mailto:ucaydas@firat.edu.tr)

(Geliş/Received: 30/01/2021;

Kabul/Accepted: 13/02/2021)

**Öz:** Tel erozyonla işleme (TEİ) yöntemi işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan Ti 6Al 4V alaşımının işlenmesinde kullanılan geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Yöntemde işlenen malzeme yüzeyinde, çatlaklar, yeniden katılmış artık tabakalar ve kraterler gibi malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen istenmeyen oluşumlar meydana gelmektedir. Bu oluşumların ortadan kaldırılarak hem mekanik özelliklerinin hem de yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için ikinci bir bitirme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada tel erozyon yöntemiyle sabit işleme koşullarında işlenmiş olan Ti 6Al 4V alaşımından imal edilmiş olan numunelerin yüzey kaliteleri manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemiyle artırılmıştır. Çalışmada, işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametrelerinin işlem performansı üzerindeki etkileri Taguchi L9 ortogonal dizin deneysel tasarımıyla incelenmiştir. Manyetik aşındırıcılarla işleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları (YPIÖ) ve talaş kaldırma oranları (TKO) belirlenmiştir. Numunelere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve yüzey özellikleri ve artık tabaka yapıları incelenmiştir. Çalışma sonucunda TKO değerlerinin işleme süresinin artmasıyla azalırken, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarının artmasıyla arttığı, YPIÖ değerlerinin ise ortalama %92 olarak ölçüldüğü ve uygun işleme koşullarıyla bu sonucun %96 oranlarına kadar arttığı tespit edilmiştir. Artık tabaka miktarının ise yapılan bütün deneylerde tamamen ortadan kaldırıldığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Manyetik aşındırıcılarla işleme, Tel erozyonla işleme, Yüzey kalitesi, Artık tabaka, Ti-6Al-4V

### Improvement of Surface Quality of W-EDMed Ti 6Al 4V Alloy by Magnetic Abrasive Finishing

**Abstract:** Wire electro discharge machining method is an unconventional manufacturing method used in the machining of Ti 6Al 4V alloy, which is in the group of materials that are difficult to machine. Undesirable formations such as cracks, recast layers and craters that affect the mechanical properties of the material occur on the surface of the material machined in the method. A second finishing process is required to eliminate these formations and improve both the mechanical properties and the surface quality. In this study, the surface qualities of the specimens made of Ti 6Al 4V alloy machined with wire electro discharge method under constant machining conditions were increased by magnetic abrasive finishing method. In the study, the effects of machining time, abrasive size, number of cycles and magnetic field parameters on process performance were investigated with the experimental design of Taguchi L9 orthogonal array. After machining with magnetic abrasives, surface roughness improvement rates (SRIR) and material removal rates (MRR) were determined. Scanning electron microscopy (SEM) images of the specimens were taken and surface properties and recast layer structures were examined. As a result of the study, it was determined that the MRR values decreased with the increase of the processing time; increase with the increase of abrasive size, the rotation number and the magnetic field, SRIR values were measured as 92% on average and this result increased up to 96% with appropriate processing conditions. It has been determined that the amount of residual layer has been completely removed in all experiments.

**Key words:** Magnetic abrasive finishing, Wire electro discharge machining, Surface quality, Recast layer, Ti-6Al-4V.

#### 1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında kullanılan bir ürüne ham maddeden nihai ürün oluşumuna kadar geçen süreçte genellikle, döküm, plastik şekil verme, talaşlı imalat ve gerekli olması halinde ısıl işlem basamakları uygulanmaktadır. Bu süreçler sonrasında oluşan ürünlerde farklı seviyelerde yüzey pürüzlülüğü ve kılcal çatlaklar,

\* Sorumlu yazar: mahmutcelik@erciyes.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0003-4272-1319, <sup>2</sup> 0000-0001-6189-6830, <sup>3</sup> 0000-0001-6706-1332

ısıdan etkilenen bölgeler ve çizikler gibi istenmeyen yüzey ve yüzey altı kusurlar meydana gelmektedir. Bu oluşumlar ürünlerin sadece kullanılabilirliğini değil aynı zamanda aşınma dayanımı, yorulma mukavemeti ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerini de etkilemektedir. İşleme yöntemi, malzeme türü, mikroyapı ve fizikokimyasal reaksiyonlar gibi birçok faktöre bağlı olan bu yüzey kusurlarının önemli ölçüde üstesinden gelebilmek için bu faktörlerin her birinin etkileri dikkate alınmalıdır [1].

Bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte, mühendislik malzemelerinden beklenen performans ve kalite gibi özelliklere yönelik talepler artmaktadır. İmalat teknolojilerindeki yaşanan gelişmeler neticesinde, yüzey kalitesinin yanı sıra mekanik özellikler de mühendislik parçalarının ayırt edici özellikleri arasında yerini almıştır.

Özellikle havacılık-uzay, biyomedikal ve otomotiv sektöründe yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı malzemelere olan talep giderek artmaktadır.

Titanyum ve alaşımları sahip oldukları yüksek dayanım, ısı ve korozyon direnci; düşük yoğunluk gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır [2, 3]. Yer kabuğunun %6'sını oluşturan titanyum, sahip olduğu bu üstün özellikler sayesinde; vücut içi implant, protez ve ameliyat ekipmanları imalatı [4, 5]; uçak motorlarının giriş kanatçıkları, düşük ve yüksek basınç kompresör kanatçıklarının imalatı gibi yüksek teknolojinin kullanıldığı bir çok alanda kullanılmaktadır [6]. Mekanik olarak beklentileri karşılayan titanyum ve alaşımlarının çalışma koşulları da dikkate alındığında, ürünlerin yüzey kalitesinin oldukça yüksek olması gerekmektedir.

Ancak titanyum ve alaşımlarının işlenmesi sırasında bir takım sorunlarla karşılaşmaktadır [7]. Geleneksel talaşlı imalat sırasında, malzemenin sahip olduğu düşük termal iletkenlik ve yüksek mukavemet sebebiyle kesici takım ile iş parçası arasında yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte ve talaş oluşumunu sağlayan plastik deformasyon zorlaşmaktadır. Öte yandan artan sıcaklıkla birlikte iş parçası ile kesici takım arasında kimyasal tepkimeler gerçekleşmekte ve sonuç olarak iş parçası kesici takımın yüzeyine yapışmakta ve hızla aşınarak işlenen yüzeyin kalitesini düşürmektedir [8]. Bu sebeple, titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde genellikle geleneksel olmayan imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda kullanılan geleneksel olmayan yöntemlerden bir tanesi de elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemidir.

EEİ yönteminde, vuruş ve vuruş ara süresince, yüzey ani ısınma ve soğumaya maruz kalmakta ve elektriksel işleme parametrelerinin seviyelerine de bağlı olarak yüzey ve yüzey altında mikroyapısal değişimler meydana gelmektedir. Dolayısıyla EEİ ile işlenen yüzeylerde sert ve kırılğan bir artık tabaka oluşmakta ve bu tabakada bulunan kılcal çatlaklar, artık gerilmeler ve yeniden katılaşmış eriyikler malzemenin başta yorulma dayanımı olmak üzere çalışma ömrünü ve diğer mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [9].

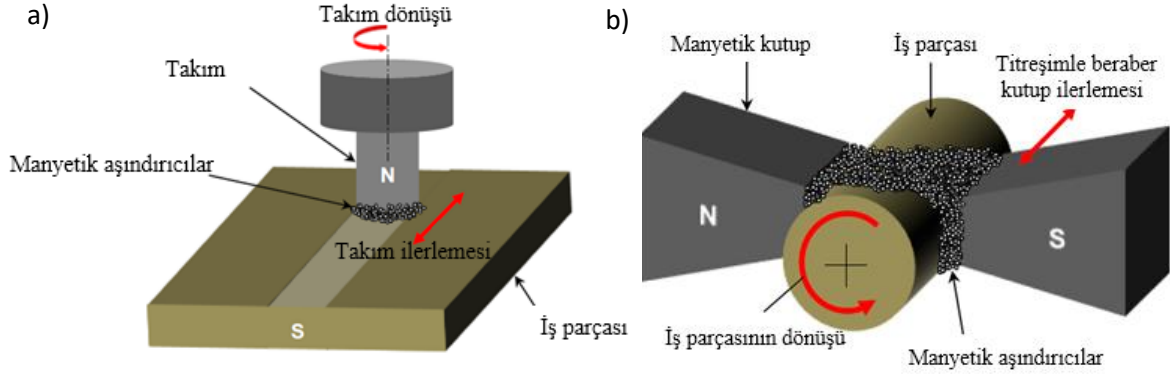
EEİ işlemi sonrası oluşan bu yapıların ortadan kaldırılması amacıyla birçok farklı yöntemin denendiği çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda elektrot ya da iş parçasına ultrasonik titreşimler verilerek suretiyle, ara bölgede kaldırılan talaşların artan sıvı sirkülasyonu ile daha etkin bir şekilde uzaklaştırıldığı ve böylece yüzeyde eriyerek yeniden katılaşan tabaka kalınlığının azaldığı görülmüştür [10–12]. Diğer bir yöntem olarak dielektrik sıvısı içerisine aşındırıcı tozlar katılmak suretiyle yöntemin veriminin artırılması sağlanmıştır [13–16]. Ayrıca işlem esnasında malzeme yüzeyinin sert ve ince filmlerle kaplanması amacıyla, sıvı içerisine krom, grafit gibi tozlar katılarak malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmek de denenen diğer bir yöntemdir [17–19].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, yöntemin veriminde artış olmasına rağmen iş parçası yüzeyinde bulunan yeniden katılaşmış yüzey tabakası ve çatlaklar gibi istenmeyen oluşumların azaldığı ancak tamamen ortadan kaldırılamadığı tespit edilmiştir. Bu oluşumların ortadan tamamen kaldırılabilmesi için malzeme yüzeyinin ayrıca bir bitirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir [20]. Elektrokimyasal taşlama, mekanik taşlama ve bilyeli parlatma gibi yöntemler bu amaçla kullanılan yöntemlere örnek olarak gösterilebilir [21–23]. Ancak alışılmamış iyileştirme yöntemlerinin oldukça maliyetli ve uygulamalarının sınırlı oldukları görülmektedir. Mekanik yüzey iyileştirme yöntemlerinde ise, mekanik etki ve yüksek kesme kuvvetleri nedeniyle yüzey işlenebilirliği zorlaşmaktadır. Diğer yandan, manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemi de kolay uygulanabilirliği, esnek yapısı, mikro talaş kaldırma ve daha düşük kesme kuvvetleri gibi özelliklerinden dolayı, EEİ sonrasında oluşan artık tabakanın kaldırılmasında tercih edilebilir bir yöntemdir.

MAİ yöntemi, işleme kuvvetlerinin bir manyetik alan tarafından kontrol edildiği geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Yöntemde iş parçası bir manyetik alan kaynağının kuzey ve güney kutupları arasına yerleştirilmektedir. İş parçası ile kutuplar arasında bulunan boşluğa ise manyetik olarak demir esaslı parçacıklar ve aşındırıcı olarak  $Al_2O_3$ , SiC, B<sub>4</sub>C, elmas vb. parçacıklardan oluşan bir karışım (manyetik aşındırıcı fırça takımı (MAFT)) yerleştirilmektedir. İş parçası ve/veya MAFT'in göreceli hareketi neticesinde manyetik alan etkisinde bulunan MAFT çok noktadan kesme yaparak içerisinde bulunan aşındırıcı taneciklerin boyutlarına bağlı olarak mikro düzeyde talaş kaldırır. Bunun sonucunda iş parçası yüzeyinde; yüzey pürüzlülüğünde azalma, çapakların yok olması gibi geometrik özelliklerde; yüzey altında; gerilim katmanlarının yok olması gibi mekanik ve fiziksel

özelliklerde değişiklik olmasıyla yüzey kalitesi artmakta, yüzey tamlığı sağlanmakta, ürünün hizmet kalitesi ve süresi gelişmektedir.

Yöntemde kullanılan takım esnek olduğu için, silindirik yüzeyler, düzlemsel yüzeyler, formlu yüzeyler ve karmaşık şekilli yüzeyler kolaylıkla işlenebilmektedir. Yöntemin farklı yüzeyler için çalışma prensibi şematik olarak Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. MAİ yönteminin farklı yüzeylerde uygulanışı: a) düzlemsel yüzeyler, b) silindirik yüzeyler [24].

MAİ yöntemi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde yöntemin ilk olarak 1929 [16] ve 1940 [17] yıllarında uygulamaya geçtiği, ancak yöntemin pratik hale gelmesi 1980’li yıllara tekabül etmektedir. Bu tarihten günümüze kadar olan süreçte konuyla ilgili çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmış olup bu çalışmaların başlıcaları bu bölümde özetlenmiştir.

Yapılan araştırmalar, MAİ yönteminin, silindirik, düzlemsel ve serbest formlu yüzeylerde başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir.

Silindirik yüzeylerin MAİ yöntemiyle işlendiği çalışmalar incelendiğinde, MAİ yönteminin medikal alanda kullanılan kılcal borulardan günlük hayatta kullanılan ortalama boyutlardaki borulara kadar geniş bir alanda uygulama şansı bulunduğu görülmektedir [25–29].

Düzlemsel yüzeylerin MAİ yöntemiyle işlenmesi üzerine de yapılan çok sayıda çalışma bulunmakta olup bu çalışmalar genellikle işleme parametrelerinin yüzey kalitesi ve talaş kaldırma oranındaki etkileri üzerine yoğunlaşmaktadır [30–33].

Literatürde serbest formlu yüzeyler üzerine yapılan çalışmalar da mevcut olup bu çalışmalarda genellikle küresel şekilli manyetik kutup sistemleri kullanılmaktadır [34, 35].

Öte yandan MAİ yönteminin işleme performansını artırmaya yönelik yapılan hibrit uygulamalar da mevcuttur. İş parçasına ve/veya manyetik takıma titreşim uygulamak, işleme bölgesine kimyasal çözücüler ilave etmek ya da bu uygulamaların birlikte kombinasyonlarını uygulamak MAİ yönteminin işleme performansını artırmaktadır [36–43].

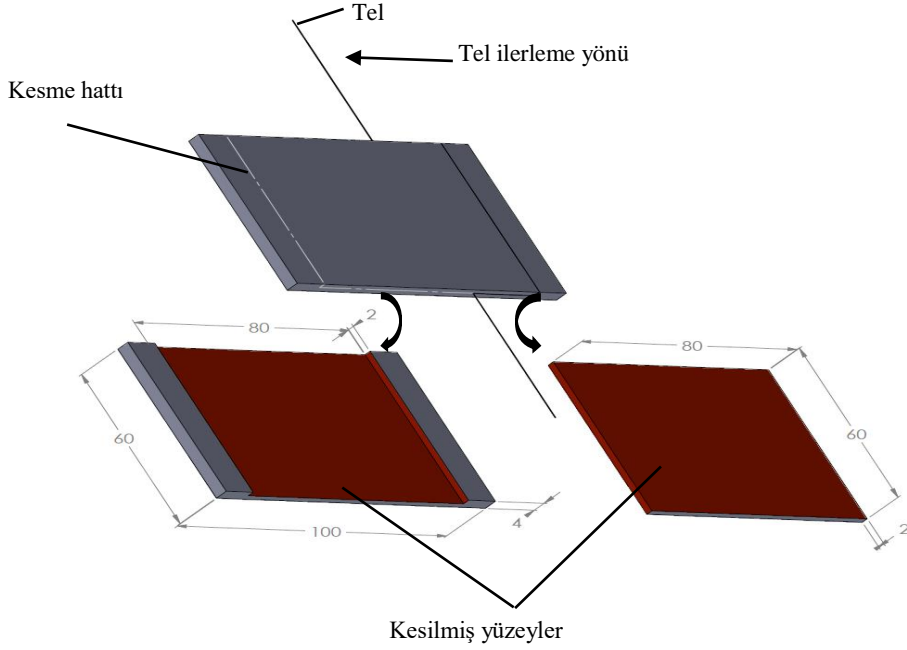
Bu çalışmada tel erozyon ile işleme (TEİ) yöntemiyle kesilmiş Ti 6Al 4V alaşımından imal edilmiş olan numunelerin yüzey kalitelerinin MAİ yöntemiyle iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda MAİ yönteminde, aşındırıcı boyutu, devir sayısı, manyetik alan miktarı ve işleme süresi parametreleri farklı seviyelerde değiştirilerek işlem üzerindeki etkileri incelenmiştir. MAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları (YPIÖ) ve talaş kaldırma oranları (TKO) belirlenmiştir. Numunelere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve yüzey özellikleri ve artık tabaka yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak MAİ yönteminin EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitelerinin artırılması için kullanılabilir bir son işlem olduğu belirlenmiştir.

## 2. Deneysel Çalışmalar

### 2.1. Numunelerin TEİ Yöntemiyle Kesilmesi

Ticari olarak temin edilmiş olan 4 X 60 X 100 mm<sup>3</sup> boyutlarındaki Ti 6Al 4V alaşımından imal edilmiş numuneler Charmilles Technologies marka Robofil 290 model tel erozyon tezgâhi ile Şekil 2’de gösterilen boyutlarda kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında kullanılan parametreler Tablo 1’de görülmektedir. Ti 6Al 4V alaşımın mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmiştir.





**Şekil 2.** Numunelerin TEİ yöntemiyle kesilmesi.

**Tablo 1.** TEİ işleme parametreleri.

Kesme Parametresi	
Tel çapı (mm)	0.25
Vurum süresi (ns)	500
Gerilim (V)	100
Tel ilerleme hızı (m/dk)	5
Dielektrik basıncı (kg/cm <sup>2</sup> )	5.5

**Tablo 2.** Ti 6Al 4V alaşımının mekanik özellikleri.

Özellik	
Sertlik (HV)	600
Erime noktası (°C)	1660
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	832
Akma dayanımı (MPa)	745
Çentik darbe tokluğu (J)	34
Elastikiyet modülü (X10 <sup>6</sup> MPa)	11.3

**Tablo 3.** Ti 6Al 4V alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
%	89.464	6.08	4.02	0.22	0.18	0.02	0.01	0.0053

## 2.2. DeneY Parametrelerinin Belirlenmesi

MAİ deneylerini etkileyen çok sayıda parametre olmasına rağmen daha önceki yapılan çalışmalar ve ön deneyler neticesinde işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametreleri 3'er farklı seviyede değiştirilmiştir. Çalışmada Manyetik aşındırıcılarla işleme deneyleri için Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal dizin deneysel tasarımı kullanılmış olup deneylere ait işleme şartları Tablo 4'te verilmiştir. Deneylerde ilerleme miktarı

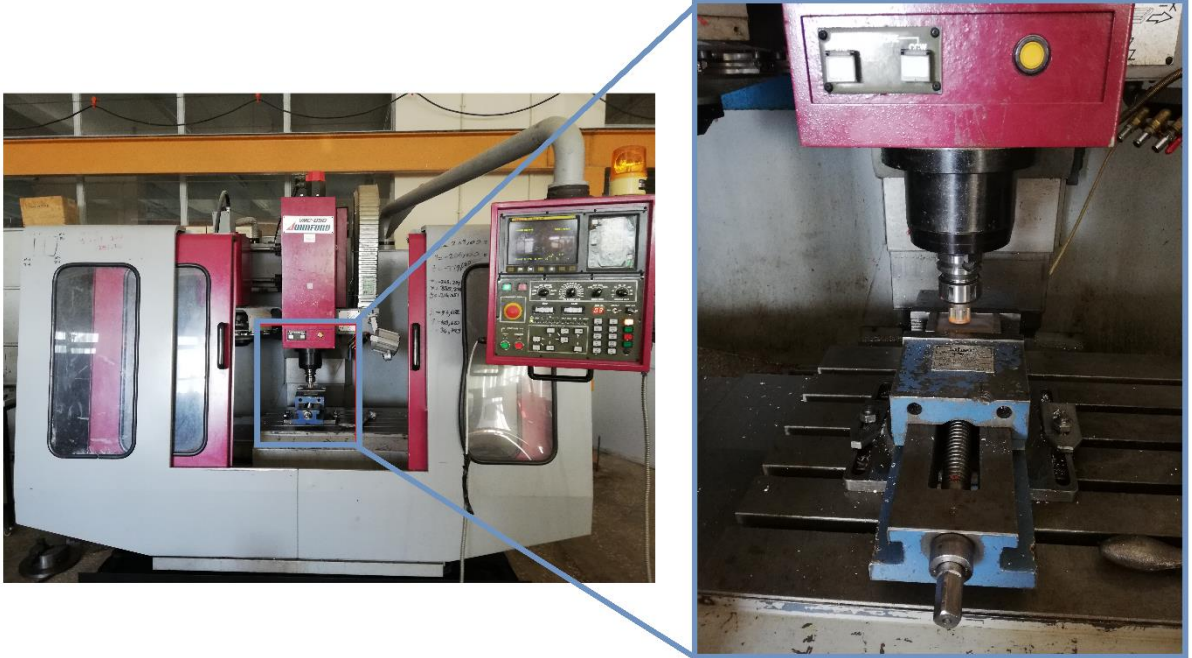
10 mm/dk, işleme boşluğu 2 mm, demir tozu boyutu 200  $\mu\text{m}$ , demir tozu miktarı 3g, SiC miktarı 1 g ve yağlayıcı miktarı 0,2 g sabit tutulmuştur.

**Tablo 4.** Deneysel tasarım tablosu.

Deney No	İşleme Süresi (dk)	Aşındırıcı Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Devir sayısı (dev/dk)	Manyetik Alan (mT)	Deney No	İşleme Süresi (dk)	Aşındırıcı Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Devir sayısı (dev/dk)	Manyetik Alan (mT)
1	20	75	400	130	6	40	106	400	145
2	30	75	600	145	7	20	150	800	145
3	40	75	800	170	8	30	150	400	170
4	20	106	600	170	9	40	150	600	130
5	30	106	800	130					

### 2.3. Deney Düzeneginin Tasarımı

Deneyel çalışmaların yapılması için gerekli olan ekipmanlardan ticari olarak temin edilebilecek ekipmanlar ticari olarak temin edilmiş olup ticari olarak temin edilemeyen özel tasarıma sahip ekipmanlar ise SOLIDWORKS 2015 Paket programı aracılığıyla tasarlanmış ve talaşlı imalat ve eklemeli imalat yöntemleriyle imal edilmiştir. Deney düzeneginin fotoğrafı Şekil 3'te görülmektedir.

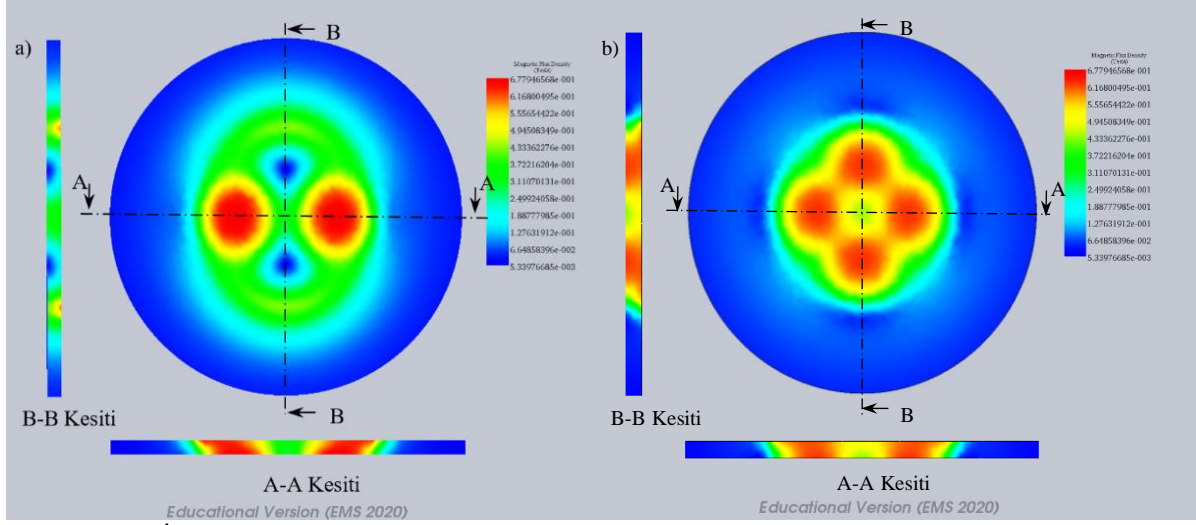


**Şekil 3.** Deney düzeneginin fotoğrafı

### 2.4. Manyetik Kutup İmalatı

Deneylerde kullanılmak üzere 3 farklı manyetik kutup sistemi hazırlanmıştır. Manyetik kutup sistemleri,  $\text{Ø}10 \times 10$  mm,  $\text{Ø}10 \times 15$  mm ve  $\text{Ø}10 \times 20$  mm ölçülerine sahip mıknatıslar kullanılarak, her bir kutup sisteminde 4'er adet mıknatıs olacak şekilde mıknatısların özel olarak tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla imal edilmiş olan tutuculara yerleştirildikten sonra bir kalıba konularak polyster reçine aracılığıyla  $\text{Ø}30 \times 50$  mm boyutlarında imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen manyetik kutuplar dik işleme merkezi pensine monte edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Mıknatısların oryantasyonu ise EMWorks 2020 paket programı aracılığıyla yapılan sonlu elemanlar analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 4-a NSNS-S oryantasyona sahip manyetik kutup sisteminde iş parçası üzerine etki eden manyetik alan yoğunluğu dağılımı gösterilmektedir. Her ne kadar NSNS-S oryantasyonu NNNN-S oryantasyonuna sahip manyetik kutup sistemine kıyasla daha yüksek manyetik alan yoğunluğuna sahip olsa da, NNNN-S oryantasyonuna sahip manyetik kutup sisteminde yoğunluk daha homojen olarak dağılmıştır (Şekil 4-b). Bu sebeple deneylerde kullanılacak olan manyetik kutup sistemlerinde NNNN-S oryantasyonu tercih edilmiştir.



Şekil 4. İş parçası üzerine etkileyen manyetik alan dağılımı (a: NSNS-S oryantasyonu, b: NNNN-S oryantasyonu).

Manyetik alan yoğunluğunun MAİ üzerindeki etkilerini görebilmek için 3 farklı manyetik kutup sistemi imal edilmiş ve bu sistemlerin oluşturduğu manyetik alan yoğunluğu PCE marka MFM 3000 model manyetik alan ölçer cihazı ile kutup sistemleri boyunca ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucu manyetik kutup sistemlerinin hat boyunca sahip oldukları ortalama manyetik alan yoğunlukları sırasıyla 130 mT, 145 mT ve 170 mT olarak tespit edilmiştir.

## 2.5. Deneyle Yapılması

Deneyle Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Johnford marka WMC 550 model CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır.

Her bir deney numunesi, deneyle öncesinde ve sonrası üzerinde bulunan yabancı maddelerden arındırılmak amacıyla Struers marka Metason 120 T ultrasonik temizleyici aracılığıyla aseton (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) çözültisi içerisinde temizlenmiştir. Yabancı maddelerden arındırılan numuneler, her bir deney öncesinde ve deney sonrasında 0.0001 gr hassasiyete sahip Precisa marka XB 220A model terazi ile tartılarak ağırlıkları ölçülmüştür.

Mengene üzerine yerleştirilen iş parçası üzerine mekanik olarak karıştırılmış manyetik aşındırıcı karışım dökülmüştür. Numune altında bulunan mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanı sebebiyle numune üzerine dökülen karışım manyetik alan çizgileri boyunca dizilmek suretiyle iş parçası üzerinde bir fırça halini almıştır. Sonrasında fener mili üzerinde bağlı olan manyetik kutup CNC kontrolü ile işleme bölgesine işleme boşluğu 2 mm olacak şekilde yaklaştırılmış ve aşındırıcı karışımı üstte bulunan mıknatıslardan çıkıp altta bulunan mıknatısa yönelen manyetik alan çizgileri boyunca konumlanarak deneyle için hazır hale gelmiştir. Belirlenen parametrelere göre deneyle başarıyla gerçekleştirilmiştir.

## 3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

### 3.1. Talaş Kaldırma Oranı Ölçüm Sonuçları

Talaş kaldırma oranları (TKO), numunelerin MAİ işleme uygulanmadan ve MAİ işleme uygulandıktan sonraki ağırlık farklarının işlem süresine bölünmeleri ve Eş.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TKO = \Delta m / t \quad (1)$$

TKO ölçüm sonuçları Tablo 5'te toplu şekilde verilmiştir. TKO değerlerinin işlem koşullarına bağlı olarak 2,265-5,813 mg/dk aralığında değiştiği görülmektedir. Ortalama TKO değeri 3,78 mg/dk olarak ölçülmüştür. Şekil 5'te işleme parametrelerinin TKO üzerindeki etkileri grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekildeki kırmızı kesikli çizgi tüm deneylelerin TKO değerinin aritmetik ortalamasını göstermektedir. Şekil incelendiğinde işleme süresinin artmasıyla TKO değeri azalmaktadır. Bu durum işlem süresince aşındırıcı taneciklerin sahip oldukları keskin

kesme kenarlarının sürtünme sebebiyle keskinliğini kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak TKO üzerinde işleme süresinin 1. seviyesinin tercih edilebilir nitelikte olduğu görülmektedir.

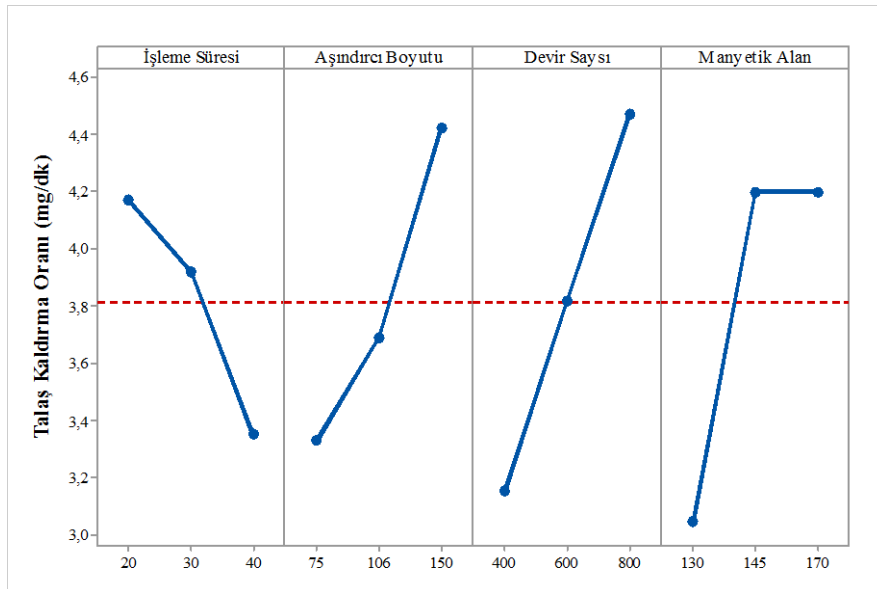
Aşındırıcı boyutunun 1. ve 2. seviyesinde yapılan deneyler sonucu ölçülen TKO değerlerinin yapılan tüm deneylerin ortalama TKO değerinin altında olduğu görülmektedir. Aşındırıcı boyutunun 3. seviyesinde ise en yüksek TKO değeri elde edilmiştir. Bu durum artan tanecik boyutuyla birlikte aşındırıcı-iş parçası temas uzunluğunun artması neticesinde birim zamanda kaldırılan talaş miktarının artması ile ilişkilendirilebilir.

MAİ yönteminde devir sayısının artması birim zamanda alınan yolu artırmaktadır. Dolayısıyla devir sayısının artmasıyla birlikte TKO değerleri de artmaktadır. Devir sayısının artması taneciklere etkiyen merkezciil kuvveti artırmaktadır, ancak manyetik kuvvetin tanecikleri bir arada tutacak büyüklükte olması taneciklerin dağılmasını engelleyecektir. Sonuç olarak devir sayısının en uygun parametresinin 3. seviye olan 800 dev/dk olduğu görülmektedir.

Manyetik alan miktarı aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine batma derinliğini doğrudan etkileyen bir parametredir. Şekil incelendiğinde manyetik alan miktarının 1. seviyesinden 2. seviyesine geçildiğinde TKO değeri üzerinde bir artış meydana gelmektedir. Ancak 2. seviyeden 3. seviyeye geçildiğinde TKO üzerinde bir değişiklik oluşmamaktadır. Bu, manyetik kuvvetin aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyinde belirli bir derinliğe kadar saplanabilmesine, bu seviyeden sonra artan manyetik kuvvetin aşındırıcı tanecikler üzerindeki baskının artmasına, ancak artan baskının aşındırıcı taneciklerin daha derine saplanmasına yeterli olmayacağına ve talaş kaldırma oranı üzerinde bir etkiye neden olmayacağı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak manyetik alan miktarı parametresinin en uygun seviyesinin 2. seviye olan 145 mT olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.** Talaş kaldırma oranı ölçüm sonuçları

Deney No	Kaldırılan Talaş Miktarı (mg)	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)	Deney No	Kaldırılan Talaş Miktarı (mg)	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)	Deney No	Kaldırılan Talaş Miktarı (mg)	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)
1	45,3	<b>2,265</b>	4	80,1	<b>4,435</b>	7	63,9	<b>5,813</b>
2	117,2	<b>3,825</b>	5	174,4	<b>3,683</b>	8	110,5	<b>4,005</b>
3	153	<b>3,906</b>	6	118,1	<b>2,952</b>	9	177,4	<b>3,195</b>



**Şekil 5.** İşleme parametrelerinin TKO üzerindeki etkileri.

### 3.2. Yüzey Pürüzlüğündeki İyileşme Oranı Ölçüm Sonuçları

Numunelerin TEİ işlemi sonrası ve MAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunan zygo ZeGage marka 3 boyutlu yüzey profilometresi aracılığıyla ölçülmüştür. Yüzey pürüzlüğündeki iyileşme oranları ise Eş. 2 yardımıyla

hesaplanmıştır.

$$YPIO = \frac{Ra_i - Ra_s}{Ra_i} \times 100 \quad (2)$$

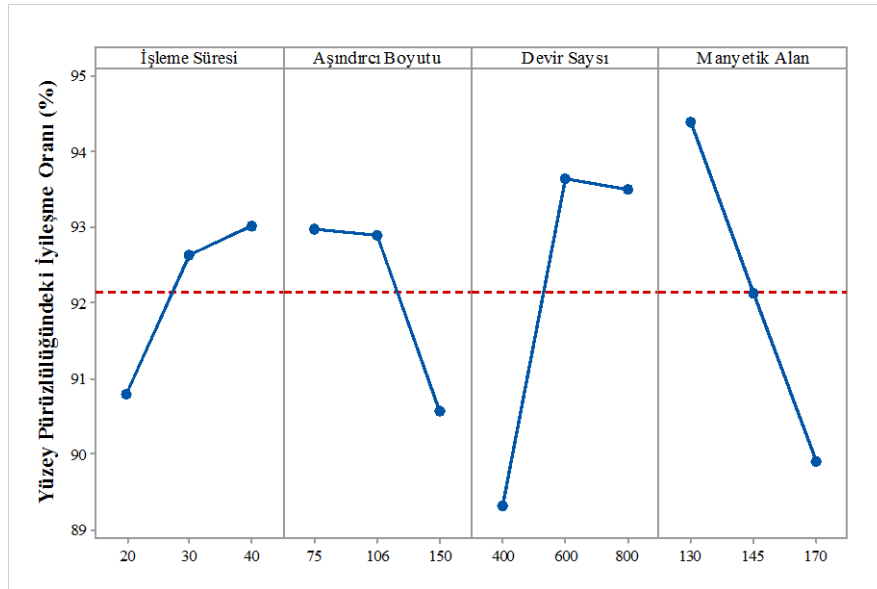
Burada  $Ra_i$  ve  $Ra_s$  sırasıyla, MAİ işlemi öncesi ve sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerini ifade etmektedir.

Numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri ve YPIÖ oranları Tablo 6'da görülmektedir. YPIÖ değerlerinin işlem koşullarına bağlı olarak %85,979-% 96,973 aralığında değiştiği görülmektedir. Ortalama YPIÖ değeri % 92,148 olarak ölçülmüştür. Şekil 6'da işleme parametrelerinin YPIÖ üzerindeki etkileri grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekildeki kırmızı kesikli çizgi tüm deneylerin YPIÖ değerinin aritmetik ortalamasını göstermektedir. Şekil 7 ise numunelere ait 3 boyutlu yüzey görüntüleri görülmektedir.

**Tablo 6.** Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı ölçüm sonuçları

Deneş No	Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri ( $\mu\text{m}$ )	Yüzey Pürüzlülüğünde İyileşme Oranı (%)	Deneş No	Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri ( $\mu\text{m}$ )	Yüzey Pürüzlülüğünde İyileşme Oranı (%)	Deneş No	Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri ( $\mu\text{m}$ )	Yüzey Pürüzlülüğünde İyileşme Oranı (%)
1	0,145	<b>91,043</b>	4	0,149	<b>90,769</b>	7	0,153	<b>90,542</b>
2	0,082	<b>94,935</b>	5	0,049	<b>96,973</b>	8	0,227	<b>85,979</b>
3	0,114	<b>92,958</b>	6	0,147	<b>90,920</b>	9	0,078	<b>95,182</b>

MAİ işlemi öncesi numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değeri =1,619  $\mu\text{m}$



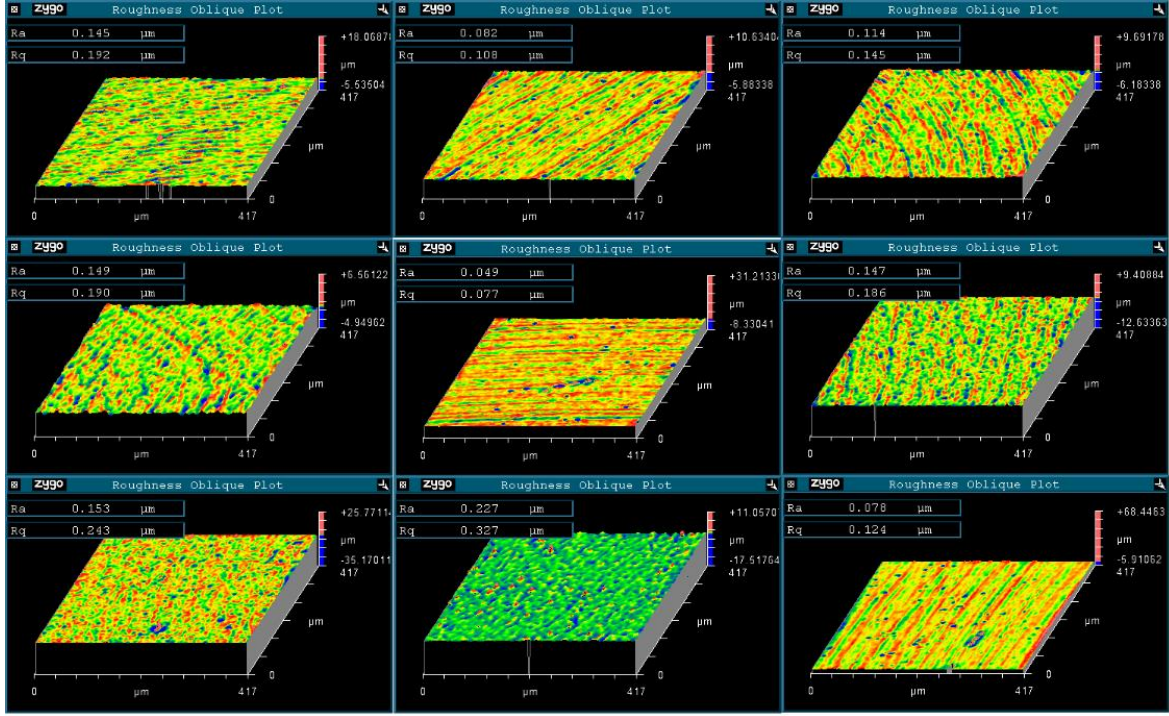
**Şekil 6.** İşleme parametrelerinin YPIÖ üzerindeki etkileri.

Şekil incelendiğinde işleme süresinin artmasıyla YPIÖ değeri artmaktadır. İşleme süresinin 1. Seviyesinden 2. seviyesine çıkmasıyla YPIÖ değerinde hızlı bir artış meydana gelirken, 2. seviyeden 3. seviyeye geçilmesiyle artış oranında bir azalma meydana gelmiştir. İşleme süresinin artmasıyla YPIÖ eğrisinin yatay bir hal alması beklenmektedir.

Aşındırıcı boyutunun artmasıyla iş parçası-aşındırıcı temas uzunluğu artmakta ve iş parçası yüzeyinde daha derin çizikler oluşturmak suretiyle talaş kaldırılmaktadır. Bu nedenle de aşındırıcı boyutunun artmasıyla YPIÖ değerinde azalma meydana gelmektedir.

Devir sayısının artmasıyla birim zamanda alınan yol arttığı için YPIÖ oranı artmaktadır. Ancak bu artış 2. seviyeden 3. seviyeye geçilmesiyle yerini azalışa bırakmaktadır. Bu durum merkezci kuvvetin etkisiyle aşındırıcıların dönme yönüne dik şekilde hareket etmiş olmaları sonucu yüzey pürüzlülük değerinde bir artışa sebebiyet vermesiyle ilişkilendirilebilir.

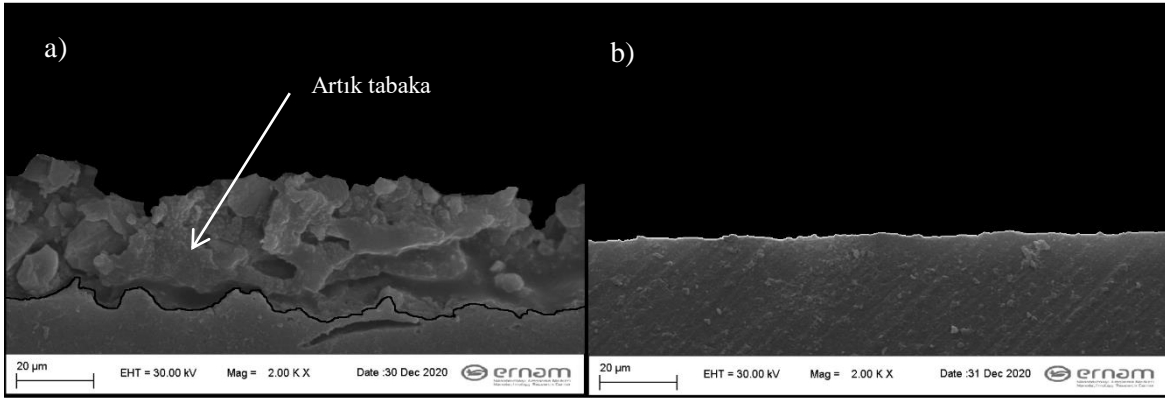
Manyetik alan miktarının artmasıyla aşındırıcıların iş parçası yüzeyinden daha derin çizikler halinde talaş kaldırılması neticesinde yüzey kalitesi daha düşük manyetik alan miktarlarına kıyasla azalmaktadır.



Şekil 7. Numunelerin MAİ işlemi sonrası yüzey topografyaları.

### 3.3. Artık Tabaka Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

TEİ ile kesim sonrası iş parçası yüzeyinde oluşan artık tabakalar ve MAİ işlemi sonrası yüzey özellikleri Erciyes Üniversitesi Nano Teknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan ZEISS LS-10 Life Science Taramalı Elektron Mikroskobu aracılığıyla incelenmiş olup MAİ işlemi öncesi belirgin halde görülen artık tabaka, MAİ işlemi sonrasında tamamen kaldırılmıştır (Şekil 8.)



Şekil 8. a: MAİ işlemi öncesi b: MAİ işlemi sonrası yüzey görüntüsü.

## 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, sanayide oldukça geniş kullanılan Ti 6Al 4V alaşımı TEİ yöntemiyle kesildikten sonra oluşan yüzeyin yüzey kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla ileri imalat yöntemlerinden olan MAİ yöntemi ile işlenmiş ve deneyler sonrasında TKO, YPIÖ ve artık tabaka kalınlıkları ölçülerek işlem parametrelerinin etkileri belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda, işleme süresinin artmasıyla TKO değerlerinde azalış meydana gelirken YPIÖ değerlerinin artmakta olduğu; aşındırıcı boyutunun artmasıyla TKO değerleri artarken YPIÖ değerlerinin azaldığı; devir sayısındaki artışın hem TKO hem de YPIÖ değerlerinde artışa sebep olduğu, ancak YPIÖ değerindeki artışın belirli bir seviyede sınırlandırıldığı; manyetik alan miktarındaki artışın TKO değerinde artışa sebep olurken YPIÖ değerinde azalışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür [27-34].

Öte yandan yapılan deneyler neticesinde bütün numunelerde TEİ ile kesim sonrasında numune yüzeyinde meydana gelen artık tabakanın MAİ işlemi sonrasında tamamen kaldırıldığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak MAİ yönteminin EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitelerinin artırılması için kullanılabilir bir son işlem olduğu belirlenmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 07/2020-04 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Yang S, Li W, Yan, S, & Li W. Surface Quality and Finishing Technology. In: Surface Finishing Theory and New Technology. Berlin: Springer Heidelberg, 2018; pp.1-63.
- [2] Chen S L, Yan B H, & Huang F Y. Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. J Mater Process Tech 1999; 87(1-3): 107-111.
- [3] He P, Zhang J, Zhou R, & Li X. Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer. Mater Charact 1999; 43(5): 287-292.
- [4] Uzun İ H, Bayındır F. Dental Uygulamalarda Titanyum ve Özellikleri. Atatürk Üniv. Diş Hek. Fak. Derg. 2010; 20(2): 213-220.
- [5] Murr L E, Quinones S A, Gaytan S M, Lopez M I, Rodela A, Martinez, E Y, ... Wicker R B. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. J Mech Behav Biomed 2009; 2(1): 20-32.
- [6] Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2011; 51(3): 250-280.
- [7] Çelik Y H, Kiliçkap, E. Titanyum Alaşımlarından Ti-6Al-4V'nin İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar: Derleme. GU J Sci, Part C 2018; 6(1): 163-175.
- [8] Minton T, Ghani S, Sammler, F, Bateman R, Fürstmann P, Roeder M. Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2013; 75: 27-35.
- [9] Manjaiah M, Narendranath S, Basavarajappa S. (2014). A review on machining of titanium based alloys using EDM and WEDM. Rev. Adv. Mater. Sci. 2014; 36(2): 89-111.
- [10] Shabgard M R, Alenabi H. Ultrasonic Assisted Electrical Discharge Machining of Ti-6Al-4V Alloy. Mater. Manuf. Processes 2015; 30(8): 991-1000.
- [11] Lin Y C, Hung J C, Chow H M, Wang A C, Chen J T. Machining Characteristics of a Hybrid Process of EDM in Gas Combined with Ultrasonic Vibration and AJM. Procedia CIRP 2016; 42:167-172.
- [12] Shabgard M R, Gholipour A, Mohammadpourfard M. Numerical and experimental study of the effects of ultrasonic vibrations of tool on machining characteristics of EDM process. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018; 96(5-8): 2657-2669.
- [13] Le V T, Banh T L, Tran X T, Thi H M N. Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with Tungsten Carbide Powder Mixing in Kerosene Fluid. Applied Mechanics and Materials 2019; 889: 115-122.
- [14] Kumar V, Kumar A, Kumar S, Singh N K. Comparative study of powder mixed EDM and conventional EDM using response surface methodology. In Mater. Today.. Proc. 2018; 5:18089-18094.
- [15] Shard A, Shikha D, Gupta V, Garg M P. Effect of B4C abrasive mixed into dielectric fluid on electrical discharge machining. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2018; 40(12): 554.
- [16] Kolli M, Kumar A. Assessing the Influence of Surfactant and B4C Powder Mixed in Dielectric Fluid on EDM of Titanium Alloy. Silicon 2019; 11(4): 1731-1743.
- [17] Toshimitsu R, Okada A, Kitada R, Okamoto Y. Improvement in Surface Characteristics by EDM with Chromium Powder Mixed Fluid. Procedia CIRP 2016; 42: 231-235.
- [18] Nguyen T D, Nguyen P H, Banh L T. Die steel surface layer quality improvement in titanium  $\mu$ -powder mixed die sinking electrical discharge machining. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019; 100(9-12): 2637-2651.
- [19] Unses E, Cogun C. Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 2015; 61(6): 409-418.
- [20] Çaydaş U. Ti6Al4V Alaşımının Elektro Erozyon Ve Elektro Kimyasal İşleme Yöntemleriyle İşlenebilirliğinin Araştırılması. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2008.
- [21] Yan B H, Wang C C, Chow H M, Lin Y C. Feasibility study of rotary electrical discharge machining with ball

- burnishing for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/6061Al composite. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2000; 40(10): 1403–1421.
- [22] Haşçalık A, Çaydaş U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Appl. Surf. Sci.* 2007; 253(22): 9007–9016.
- [23] Wang C C, Chow H M, Yang L D, Lu C Te. Recast layer removal after electrical discharge machining via Taguchi analysis: A feasibility study. *J. Mater. Process. Technol.* 2009; 209(8): 4134–4140.
- [24] Kang J. Development of high-speed internal finishing and cleaning of flexible capillary tubes by magnetic abrasive finishing. Doctoral thesis, University of Florida, Florida, 2012.
- [25] Kang J, George A, Yamaguchi H. High-speed internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing. In *Procedia CIRP* 2012; 1: 414-418.
- [26] Wang Y, Shih A, Nteziyaremye V, Li W, Yamaguchi H. Surface Finishing of Needles for High-performance Biopsy. *Procedia CIRP* 2014; 14: 48–53.
- [27] Li W, Li X, Yang S, Li W. A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance. *J. Mater. Process. Technol.* 2018; 260: 20–29.
- [28] Kajal S, Jain V K, Ramkumar J, Nagdeve L. Experimental and theoretical investigations into internal magnetic abrasive finishing of a revolver barrel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018; 100(5–8): 1105–1122.
- [29] Yamaguchi H, Shinmura T. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process. *Precis. Eng.* 2004; 28(2): 135–142.
- [30] Mulik R S, Pandey P M. Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011; 55(5–8): 501–515.
- [31] Wu J Z, Zou Y H. Study on an ultra-precision plane magnetic abrasive finishing process by use of alternating magnetic field. *Applied Mechanics and Materials* 2013; 395-396: 985-989
- [32] Jiao A Y, Quan H J, Li Z Z, Zou Y H. Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015; 80(9–12): 1613–1623.
- [33] Kanish T C, Narayanan S, Kuppan P, Denis A S. Investigations on wear behavior of Magnetic Field Assisted Abrasive Finished SS316L material. *Mater. Today: Proc.* 2018; 5: 12734-12743.
- [34] Lin C T, Yang L D, Chow H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2007; 34(1–2): 122–130.
- [35] Vahdati M, Rasouli S A. Evaluation of Parameters Affecting Magnetic Abrasive Finishing on Concave Freeform Surface of Al Alloy via RSM Method. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2016; 2016: 1-14.
- [36] Yin S, Shinmura T. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2004; 44(12–13): 1297–1303.
- [37] Mulik R S, Pandey P M. Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater* 2011; 29(1): 68–77.
- [38] Misra A, Pandey P M, Dixit U S. Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.* 2017; 133: 344–356.
- [39] Misra A, Pandey P M, Dixit U. S. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.* 2017; 131–132: 853–867.
- [40] Liu G Y, Guo Z N, Jiang S Z, Qu N S, Li Y. B. A study of processing Al 6061 with electrochemical magnetic abrasive finishing. *Procedia CIRP* 2014; 14: 234-238.
- [41] Sihag N, Kala P, Pandey P M. Chemo assisted magnetic abrasive finishing: Experimental investigations. *Procedia CIRP* 2015; 26; 539-543.
- [42] Pandey K, Pandey P M. Use of chemical oxidizers with alumina slurry in Double Disk Magnetic Abrasive Finishing for improving surface finish of Si (100). *J. Manuf. Processes* 2018; 32; 38–150.
- [43] Singh G, Kumar H, Kansal H K, Srivastava A. Effects of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on material removal of inconel 625 tubes. *Procedia Manufacturing* 2020; 48: 466-473.





## F2 Bölgesinde Sönüm Katsayılarının Karesinin (F2) Büyüklüğünün Düşük Enlemlerdeki Davranışının İncelenmesi

Kadri KURT<sup>1\*</sup>, Vahdettin KOÇ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Firat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ, Turkey  
<sup>2</sup> Adıyaman Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Adıyaman, Turkey  
<sup>\*1</sup> kadrikurt@hotmail.com, <sup>2</sup> vkocum@hotmail.com

(Geliş/Received: 27/12/2020;

Kabul/Accepted: 23/02/2021)

**Öz:** Bu çalışmanın amacı kabul edilen şartlar için belli bir frekansta yerden atmosfere dik gönderilen bir radyo dalgasının ne kadar enerji kaybettiğini araştırmaktır. Bu makalede, iyonkürenin F2 bölgesinde bazı kritik yükseklikler (390, 410, 450, 500, 550 ve 600 km) ve düşük enlemler için iyonküre plazmasında meydana gelen (ordinari, ekstraordinari ve kutuplanmış) dalgaların sönüm katsayılarının karelerinin büyüklükleri teorik olarak hesaplanmıştır. Ordinari ve ekstraordinari dalganın sönüm katsayılarının büyüklüğünün kareleri kabul edilen şartlar için elektron yoğunluğunun enlemlerle değişimi ile benzerlik göstermekte, kutuplanmış dalga ise farklı bir davranış sergilemektedir. Bu durum kutuplanmış dalganın çarpıcı bir şekilde manyetik alana bağımlılığının bir sonucu olabilir. Bunun yanında kutuplanmış dalganın sönüm katsayısının karesinin diğerlerinden daha büyük olduğundan göz önünde bulundurulmuş şartlar için daha fazla sönüme uğradığı söylenebilir.

**Anahtar kelimeler:** İyonküre, Sönüm Katsayıları, Ekvatorial Anomali.

### Investigation of the Behavior of the Magnitude of the Square of the Absorbtion Coefficients in the F2 Region at Low Latitudes

**Abstract:** The aim of this study is to investigate how much energy a radio wave, sent perpendicular to the atmosphere at a certain frequency, loses for accepted conditions. This article is theoretically calculated for the magnitude of the squares of the absorbing coefficients of waves (ordinary, extraordinary and polarized) waves that occur only in the ionospheric plasma for some critical heights (390, 410, 450, 500, 550 and 600 km) in the F2 region of the ionosphere and low latitudes. The squares of the magnitude coefficients of the ordinary and extraordinary wave are similar to the latitude variation of the electron density for the accepted conditions, and the polarized wave behaves differently. This may sharply be the result of the polarized wave of dramatically dependence on the magnetic field. On the other hand, it can be said that the damping coefficient of the polarized wave is greater than the squared damping for the conditions considered.

**Key words:** Ionosphere, The Coffecients of Absorbtion, Equatorial Anomaly

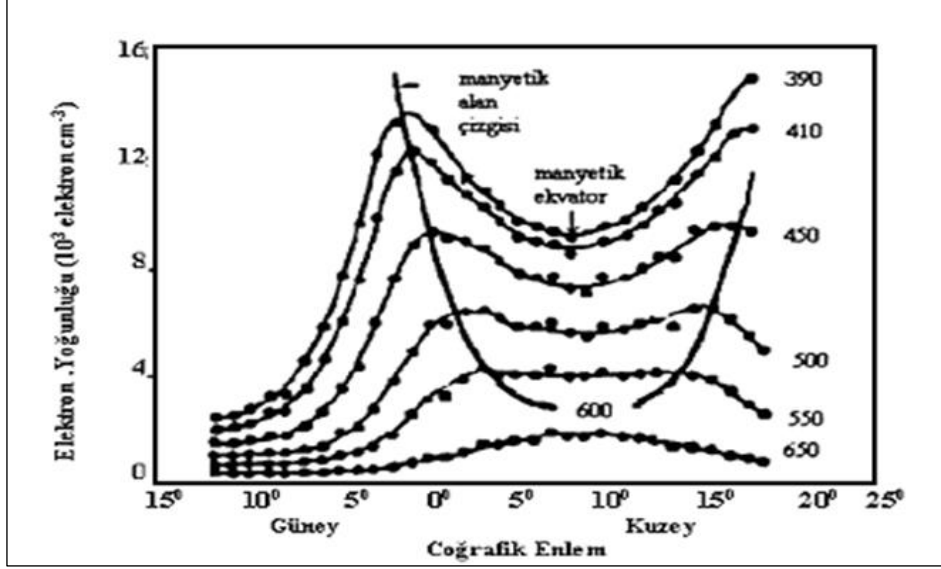
#### 1. Giriş

İyonküreyi karakterize eden ve ana omurgası olan elektron yoğunluğu; Güneş aktivitesi, jeomanyetik aktivite, coğrafik konum, yerel zaman ve mevsimler gibi parametrelere bağlıdır [1-10]. İyonküreden dalgaların yansımaları, ortamın kırılma indisi, dalganın frekansı ve iyonkürenin içindeki yüklü parçacıkların titreşim frekansları ile ilgilidir. İyonküreden yansıyan en yüksek dalga frekansı, kritik frekans olarak adlandırılır. İyonküre gündüz çok kayıplı bir ortam ve gece az kayıplı bir ortam gibi davranır. Bu durum, orta ve uzun dalga yayılımında farklar meydana getirerek dalgaların sönmesine neden olur [11-21].

İyonkürenin elektron yoğunluğu bakımından en zengin bölgesi olan F katmanı anomaliler, mevsimsel anomali ve yarıyıllık-yıllık değişimler, gece F2-bölgesi, ekvator anomalisi olarak farklı zaman ve coğrafik konumlar altında farklı davranışlar sergiler. Öğle saatlerinde  $N_mF_2$  (F2 bölgesinde maksimum elektron yoğunluğu) değerindeki mevsimsel değişime ait birçok anomali kaydedilmiştir. Gözlemler sonucunda  $N_mF_2$ 'nin kış değerlerinin yaz değerlerinden öğle saatlerinde çok daha büyük olduğu bulunmuştur. Bu durum, iyon ve elektron üretiminin kışın çok küçük olmasının beklenmesine ters bir durumdur. Bu duruma genellikle "mevsimsel anomali" veya "kış anomalisi" denilmektedir. İyonkürede  $N_mF_2$ 'nin yıllık değişimi incelendiğinde elektron yoğunluğunun Aralık ayında Haziran ayındakinden %20 daha fazla olduğu ölçülmüştür. Güneş, Yer mesafesinin değişiminden

\* Sorumlu yazar: [kadrikurt@hotmail.com](mailto:kadrikurt@hotmail.com); <sup>1</sup> Orcid ID: 0000-0002-6507-8234, <sup>2</sup> Orcid ID: 0000-0001-9510-8302

dolayı Ocak ayında en büyüktür. Buna da “yıllık anomali” denir [7-10]. Düşük enlemlerdeki F2 bölgesinin davranışı farklıdır. Bazı zamanlarda elektron yoğunluğu, gece yarısı öğle saatlerinden daha büyük olmaktadır. Burada düşey yönde oluşan difüzyon ihmal edilebilir. Çünkü iyonlaşma, yerin manyetik alan çizgilerinin bir tarafından öbür tarafına doğru dağılmaz, alan çizgileri boyunca dağılır. Bu dağılım iyonlaşmanın enlemsel dağılımına etki edebilir. Bunun yanı sıra elektromanyetik sürüklenmede elektron yoğunluğunun günlük değişimine büyük ölçüde etki eder [11-21, 7-10]



Şekil 1. Kuzey ve güney yarımkürelerde ekvatorial çukur ve tepeler [7, 10].

Şekil 1’den de görüleceği gibi, enlemin bir fonksiyonu olarak  $N_m F2'$ ’nin gece saatlerindeki değerleri, kuzey ve güney yarımkürelerde 15°- 20° enlemlerde “tepelere” birlikte manyetik dip ekvator üzerinde merkezlenmiş “çukur” denilen bir durum sergiler. Elektromanyetik sürüklenme ( $\perp \mathbf{B}$ ) ve difüzyon ( $\parallel \mathbf{B}$ ) birleşerek plazma hareketinde “fiskiye” gibi yukarı doğru artmaya neden olur. Böylece anomali tepeleri ekvator üzerinde yüksek bölgelerden difüzyon yoluyla beslenir. Burada üretim oranı çok düşüktür. Fakat plazma, üretim oranının daha büyük olduğu F2- tepesi civarında daha düşük seviyelerden çekilir [17-21].

Şimdiye kadar bir çok araştırmacı elektromanyetik dalga-küresel plazma karşılıklı etkileşimi hakkında teorik ve deneysel çalışmalar yapmıştır [13-22]. Ancak bu çalışmaların çoğunda genelde deneysel olanlar modelleme; teorik olanlar da ortam hakkında bilgi sahibi olmak için ortamı karakterize eden iletkenlik, kırılma indisi ve ortamın dielektrik yapısı kompleksidir. Çoğu çalışmada bu kompleks yapının reel kısmı göz önünde bulundurulmuştur [1-22]. Genelde ortamdaki çarpışmalar (elektron-elektron, elektron-iyon, iyon-iyon) ihmal edilmiştir. Bu çalışmada çarpışmaları ihmal etmeyerek plazma içinde meydana gelen dalgaların sönüm katsayılarının büyüklüğünün karesini ( $\beta^2$ ) düşük enlemlerde (-30°; 30°) F2 bölgesinin kritik yüksekliklerinde (390, 410, 450, 500, 550 ve 600 km) yerel zaman 12.00 YZ için; ekinoks günleri için çalışılmıştır. Bu şartları çalışmanın temel amacı, Şekil 1’de meydana gelen ekvator çukuru bölgesinde, bu dalgaların sönüm katsayılarının karelerinin büyüklüklerinin davranışı nasıldır? Sorusunun cevabının bazı koşullarda teorik model kullanarak vermeye çalışmaktır.

### 1.1. Plazmanın Kırılma İndisi

İyonküre plazmasının elektrik iletkenliği ve kırılma indisi elektronun çarpışma frekansını ve dalga frekansına bağlıdır. Çarpışma frekansı, dalganın yansımaları ve kırılma şartlarını değiştirmektedir. Plazmada termik hareketler göz önüne alınmazsa bu durum soğuk plazmayı tanımlar [6-10, 14-16, 19-20].

İlgili literatürden de yararlanılarak yukarıda değinilen durumların göz önüne alınmasıyla elde edilen soğuk plazmaya ilişkin denklemler aşağıdaki gibidir.

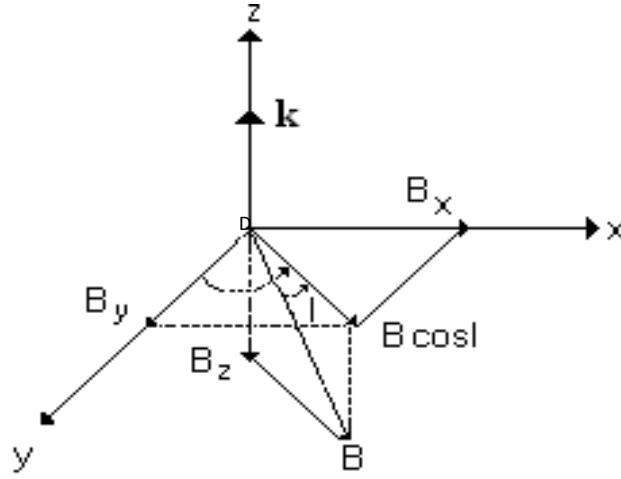
## 1.2. Dalga Denklemleri

Kütlesi  $m$ , hızı  $\mathbf{V}$  olan bir elektronun üzerine etki eden kuvvet,

$$m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -e[\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}] - m\nu \mathbf{V} \quad (1)$$

dır. Hız ve alanların  $e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$  şeklinde değiştiği kabul edilecektir. Bu çalışmada, kuzey yarım kürede dalga  $z$  doğrultusunda ilerlemektedir [6-10]. Yerin manyetik alanı,

$$\mathbf{B} = B_x \mathbf{a}_x + B_y \mathbf{a}_y + B_z \mathbf{a}_z \quad (2)$$



Şekil 2. Dünyanın manyetik alanının geometrisi

Burada,  $B_x = B \cos I \sin D$ ,  $B_y = B \cos I \cos D$  ve  $B_z = -B \sin I$  dır.  $I$  manyetik dip ve  $D$  manyetik deklinasyon açısıdır. Bu çalışmada kullanılacak diğer rotasyonlar şu şekildedir. (2) denklemi, akım yoğunluğu, Maxwell denklemlerin ikinci ve üçüncü denklemleri beraber ifadesi ortamın iletkenliğine bağlı olarak kırılma indisi tensörü;

$$\begin{bmatrix} n^2 - 1 - \frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{xx} & -\frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{xy} & -\frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{xz} \\ -\frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{yx} & n^2 - 1 - \frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{yy} & -\frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{yz} \\ -\frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{zx} & -\frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{zy} & -1 - \frac{i}{\epsilon_0 \omega} \sigma_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

şeklinde bir matrise dönüşür. Bu matris dalganın ilerlemesiyle ilgili bilgileri içermektedir. Bunun çözümü kırılma indisini verir [7-10].

Düşey iyon sondalarda olduğu gibi, dalga z doğrultusunda (Şekil 2.,  $\mathbf{k}/\mathbf{B}$ ) ilerlemektedir. Bu nedenle, Yer in manyetik alanının düşey bileşeni dalganın ilerlemesine etki eder. Bu şartlarda bağıntı 3'ün determinantının çözümünden,

$$a) \omega_p^2 = \omega^2 U \quad \text{Plazma titreşimidir} \quad (4)$$

$$b) n_k^2 = 1 - \frac{X(1 \mp Yz)}{(1 \mp Yz)^2 + Z^2} + iZ \frac{X}{(1 \mp Yz)^2 + Z^2} \quad (5)$$

olarak bulunur. Bunlar sağa (-) ve sola (+) kutuplanmış iki dalgadır. Aynı zamanda Yer'in manyetik alanının  $B_y$  bileşeni, y doğrultusunda da dalga meydana getirir. Bu ise,

$$a) n_0^2 = 1 - \frac{X}{1 + Z^2} + iZ \frac{X}{1 + Z^2} \quad (6)$$

ordinari dalgadır. Bu dalga Yer in manyetik alanına bağlı değildir. Diğeri ise,

$$b) n_{ex}^2 = 1 - \frac{aX(1 - X) + Z^2X(2 - X)}{a^2 + b^2} + iZ \frac{X(1 - X)(2 - X) - aX}{a^2 + b^2} \quad (7)$$

extraordinari dalgadır ve X, Yz manyeto-iyonik parametrelerdir. Burada  $a = 1 - x - Yy^2 - Z^2$  ve  $b = z(2 - x)$  'dir. Bağıntı (7) ile verilen dalga aynı zamanda x doğrultusunda da görülmektedir. Sadece a ve b içindeki  $Y_y$ ,  $Y_x$  olacaktır. Çarpışmalar göz önüne alındığında, kırılma indislerinin kareleri (5 - 7) kompleks bir ifadedir [6-10].

Eğer kırılma indisi  $n^2 = (\alpha + i\beta)^2 = M + iN$  şeklinde yazılırsa reel ve sanal kısımları,

$$\alpha^2 = \frac{1}{2} \left[ \left( M^2 + N^2 \right)^{1/2} + M \right] \quad (8)$$

$$\beta^2 = \frac{1}{2} \left[ \left( M^2 + N^2 \right)^{1/2} - M \right] \quad (9)$$

olmaktadır [4-6, 9-10, 18-22].

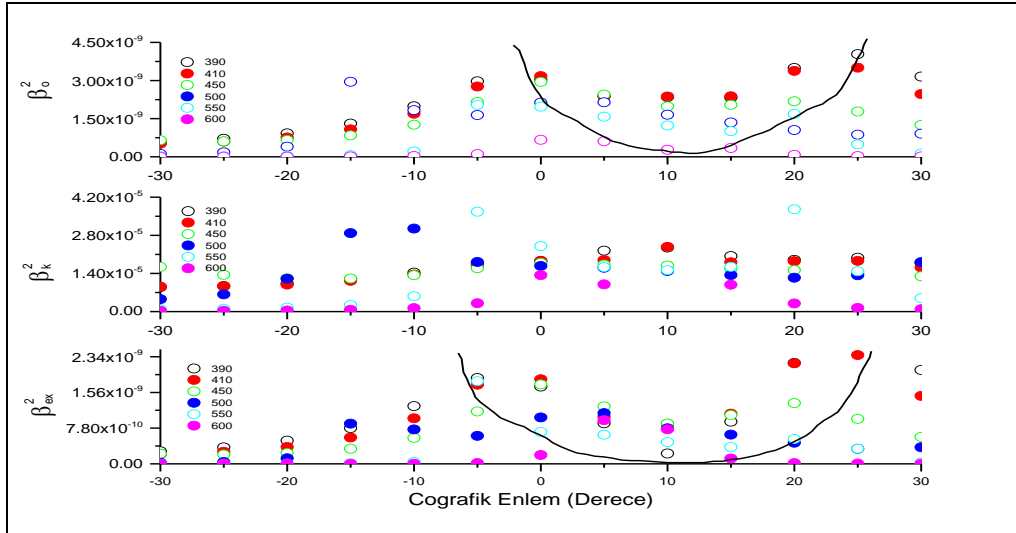
Yüklü parçacıkların diğer parçacıklarla çarpışması, kırılma indisinin reel ( $\alpha$ ) ve sanal ( $\beta$ ) kısımları üzerine etki etmektedir. Dalganın sönüme uğraması  $\beta$  ile temsil edilmektedir [7-10]. Elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni  $E = E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)}$  ile temsil edilir ve bir ortamda ilerlerken ortam homojen değilse maddenin her durumu için geçerli (katı,sıvı, gaz ve plazma) hem dalga vektörü  $\mathbf{k}$  hem reel hem de sanal kısma sahiptir ( $k = \alpha + i\beta$ ). Dalga herhangi bir ortama girdiğinde iki durum gerçekleşebilir. Bunlardan ilki, dalga ortama enerji vererek ortamda bulunan parçacıkların enerjileri artırır (dalga-ortam etkileşmesi) ya da ortamdaki parçacıklar dalgaya enerji aktarabilir (ortam-dalga etkileşmesi). Dalga ortama enerji aktardığında dalganın genliğinde azalma olur tersinde

ise artış meydana gelir eğer bu durum bir metalde meydana gelirse; metaldeki atomların titreşim enerjileri, yüklü parçacıkların kinetik enerjilerin artmasına ve parçacıkların ısı enerjilerinin artışına neden olarak ortamın sıcaklığının artması ile sonuçlanır [1-22]. Yüksek frekanslı dalgalarda (HF),  $Z \ll 1$  olmaktadır. Bu nedenle,  $(1 + Z^2)^{-1} \approx 1 - Z^2$  şeklinde açılabilir. Kutuplanmış (5), ordinari (6) ve ekstraordinari (7) dalgalara ait kırılma indislerinin reel kısımları ve faz hızları bu açılım kullanılarak hesaplanmıştır. Eğer (**kLB**) ise, burada manyetik alandan bağımsız ordinari ve manyetik alana bağımlı ekstraordinari dalgalar oluşmaktadır. (**k/B**) durumunda da z yönünde kutuplanmış veya boyuna dalgalar meydana gelir, x ve y'de ekstraordinari dalgalar oluşur [21, 23].

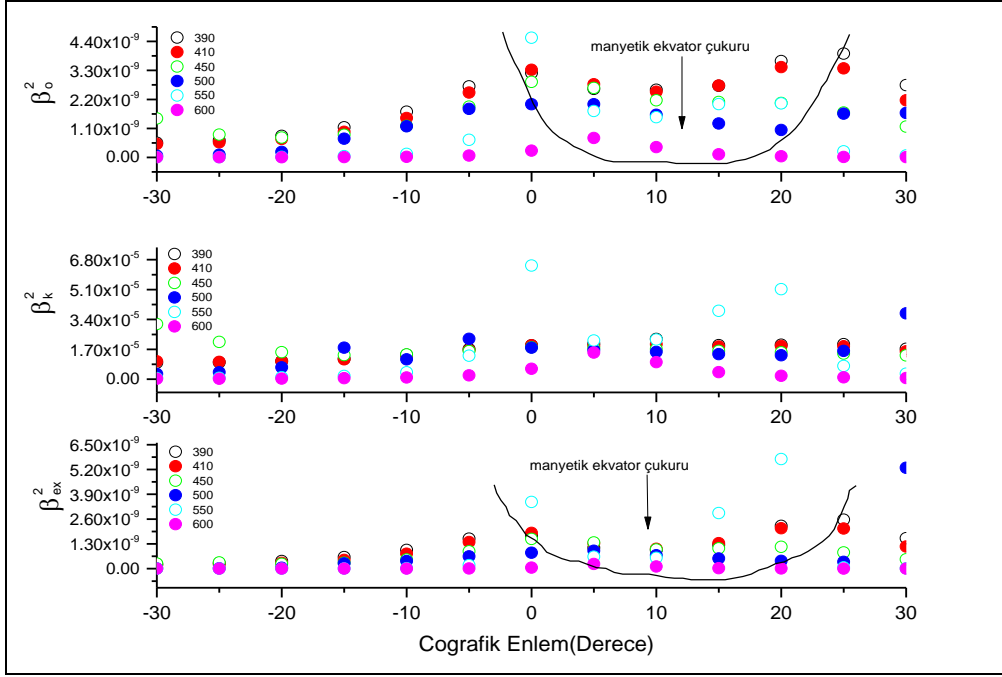
## 2. Bulgular ve Tartışma

### 2.1. Nümerik Analiz ve Tartışma

Bu çalışmada çarpışmaları ihmal edilmeyerek plazma içinde meydana gelen dalgaların sönüm katsayıları ( $\beta$ ) düşük enlemlerde ( $-30^\circ; 30^\circ$ ) F2 bölgesinin kritik yüksekliklerinde (390, 410, 450, 500, 550 ve 600 km) yerel zaman 12.00 YZ Kabul edilerek ekinoks (gün-tün eşitliği) günleri için çalışıldı. Şekil 3'te saat 12.00 YZ için göz önünde bulundurulmuş şartlar için düşük enlemlerde dalgaların sönüm katsayılarının kareleri ( $\beta^2$ ) 21 Mart için verilmiştir. Buna göre bütün dalgaların sönüm katsayılarının kareleri kabul edilen şartlar için eğilim olarak birbirine benzerdir. Büyüklük olarak bir sıralama yapılırsa ( $\beta_k^2 > \beta_0^2 > \beta_{ex}^2$ ) yapılabilir. Aldığı değerler literatürde daha önceden yapılmış sönüm katsayıların değerleri ile uygunluk göstermektedir. Ancak Şekil 1'de verilen elektron yoğunluğunun enlemle ( $N_m F2$ ) değişimi göz önünde bulundurulmuş şartlar için; ordinari ve ekstraordinari dalgaların sönüm katsayılarının kareleri çarpıcı bir benzerlik göstermektedir. Yani Şekil 1'e göre  $N_m F2 0^\circ$  ve  $15^\circ$  de pik değerlerine ulaşmakta hemen hemen aynı enlemlerde de ordinari ve ekstraordinari dalgalar da maksimum değer almakta ve bu iki enlem arasında Şekil 1'e benzer çukur (manyetik ekvator çukuru) oluşturmaktadır. Fakat aynı şartlar için kutuplanmış dalganın davranışı hakkında aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. Bu dalganın sönüm katsayıları daha büyük maksimumları olduğu enlemler sola doğru yani güneye doğru yaklaşık olarak  $5^\circ$  kaydığı gözlenmektedir. Şekil 4'te dalgalarının sönüm katsayılarının kareleri 23 Eylül ve saat 12.00 YZ için incelenmiştir. Buna göre Şekil 3'e kıyasla benzerlik göstermesine rağmen daha küçük değerler almaktadır. Büyüklükleri sırasıyla ( $\beta_k^2 > \beta_0^2 > \beta_{ex}^2$ ) olduğu gözlenmektedir. Şekil 3'teki gibi aynı enlemlerde ordinari ve ekstraordinari dalgalar tepeler ve çukur oluşturmaktadır.



Şekil 3. Dalgaların sönüm katsayılarının düşük enlemlerde değişimi (Mart 21, saat 12.00 YZ).



Şekil 4. Dalgaların sönüm katsayılarının düşük enlemlerde değişimi (Eylül 23 saat 12.00 YZ).

Bu çalışmanın amacı, Şekil 1 de verilen ionosferde belirli kritik yüksekliklerde elektron yoğunluğunun düşük enlemlerde coğrafik enlemlerde değişimi ekvatoradan kuzey enlemlere doğru bir çukur meydana getirmektedir. Bu çukur literatürde manyetik ekvator çukuru olarak bilinmektedir. Buna göre bu enlemlerde yerden ekvatora dik gönderilen bir elektromanyetik dalganın kabul edilen şartlarda ve coğrafik koordinatlarda nasıl bir değişim göstermektedir? Bu sorunun cevabı bu çalışmanın amacını yansıtmaktadır. Elde edilen bulgulara göre sönüm katsayılarının değişimi, elektron yoğunluğunu değişimi ile harmoni içindedir.

### 3. Sonuç ve Öneriler

Bu makalede, ionokürenin F2 bölgesinde bazı kritik yükseklikler için (390, 410, 450, 500, 550 ve 600 km) sadece ionküre plazmasında meydana gelen (ordinari, ekstraordinari ve kutuplanmış) dalgaların sönüm katsayılarının karelerinin büyüklükleri teorik olarak hesaplanmıştır. Bu yüksekliklerde elektron yoğunluğunun tepe yaptığı enlemlerde ordinari ve extra-ordinari dalgada tepe oluşturmuştur fakat kutuplanmış dalga böyle bir davranış göstermemektedir. Ordinari ve extra-ordinari dalga Şekil 2'deki manyetik ekvator çukuru oluşturmuştur. Ordinari dalga manyetik alandan bağımsız fakat kutuplanmış dalgalar ekstraordinari dalgaya kıyasla daha şiddetli bağımlıdır. Bundan dolayı ordinari ve ekstraordinari dalganın sönüm katsayılarının kareleri elektron yoğunluğu değişimi ile uyum göstermekte fakat bu şartlarda kutuplanmış dalga daha fazla sönüme uğradığını söylemek mümkündür.

Bu çalışma, dar bir coğrafik enlemlerde yapıldığı için genele yayılabilir ve çeşitli parametreler hareket denkleminde ilave edilerek( örneğin sıcaklık ve yayılma vektörü  $k$ 'nin üç boyutta alınması gibi) farklı metotlar kullanılarak daha geniş bir taban oluşturulabilir.

### Kaynaklar

- [1] Sagir, S., Atici, R., Akalin, Y., Yesil, A. The assessment in terms of QBO of NeQuick 2 model, The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 2019; 22 (1): 67-72.
- [2] Rishbeth, H., How the Thermospheric Circulation Affects the Ionospheric F2-Layer, Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics 1998; 60: 1385-1402.
- [3] Timocin, E., Unal, I., Yesil, A. The Effect of the Midlatitude Electron Density Trough on the Ionospheric Conductivities, Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science 2019; 43 (1): 297-307.
- [4] Yesil, A., Kurt, K. Calculation of electric field strength in the ionospheric F-region, Thermal Science 2019; 22 (Suppl. 1): 159-164.

- [5] Timocin, E., Yesil, A., Unal, I. The effect of the geomagnetic activity to the hourly variations of ionospheric foF2 values at low latitudes, *Arabian Journal of Geosciences* 2014; 7 (10): 4437-4442.
- [6] Unal, I., Senalp, E.T., Yeşil, A., Tulunay, Y., Tulunay, E. Two possible approaches for ionospheric forecasting to be employed along with the IRI model, *URSI General Assembly and Scientific Symposium*. 2011; 1-4.
- [7] Swanson, D.G. *Plasma waves*, Academic Press, New York, 1989.
- [8] Whitten, R.C., Poppoff, I.G. *Fundamentals of Aeonomy*, John Willey and Sons, New York, 1971.
- [9] Budden, K.G. *The Propagation of Radio Waves*, Cambridge University Press, Cambridge, 1988.
- [10] Budden, K.G., Stott, G.F. Rays in magneto-ionic theory-II, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* 1980; 42: 791-800.
- [11] Kurt, K., Yeşil, A., Sagir, S., Atici, R. The relationship of stratospheric QBO with the difference of measured and calculated NmF2, *Acta Geophysica* 2016; 64 (6): 2781-2793.
- [12] Unal, I., Senalp, E.T., Yeşil, A., Tulunay, Y., Tulunay, E. Performance of IRI-based ionospheric critical frequency calculations with reference to forecasting, *Radio Science* 2011; 46 (01): 1-10.
- [13] Yesil, A., Sagir S., Kurt, K. The Behaviour of the Classical Diffusion Tensor for Equatorial Ionospheric Plasma, *Journal of Science* 2016; (13) 123-127.
- [14] Yesil, A., Unal, I. *Electromagnetic Wave Propagation in Ionospheric Plasma, Behaviour of Electromagnetic Waves in Different Media and Structures* 2011; 1-189.
- [15] Yesil, A., Sagir, S. Updating Conductivity Tensor of Cold and Warm Plasma for Equatorial Ionosphere F2-Region in The Northern Hemisphere, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science* 2019; 43 (1): 315-320.
- [16] Sagir, S., Yesil, A. The Relation Between the Refractive Index of the Equatorial Ionospheric F2 Region and Long-Term Solar Indices, *Wireless Personal Communications* 2018; 102 (1): 31-40.
- [17] Yesil, A., Sagir, S., Kurt, K. The Behavior of the Classical Diffusion Tensor for Mid-Latitude Ionospheric Plasma, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2016; 5 (2).
- [18] Sagir, S., Karatay, S., Atici, R., Yesil A., Ozcan, O. The relationship between the Quasi Biennial Oscillation and Sunspot Number, *Advances in Space Research* 2015; 55(1): 106-112.
- [19] Yesil, A. *The Effect of the cold plasma on the propagation of the electromagnetic waves*, Firat University, Elazig, 1995.
- [20] Yesil, A. Unal, İ. *The Electromagnetic waves in the fully ionozed plasma*, Firat University, Elazig, 2002.
- [21] Yesil, A. The Effect of the Electron Temperature on the Electric Polarization Coefficient of Ionospheric Plasma, *International Journal of Science & Technology* 2016; 1 (2): 125-130.
- [22] Kaladze, T., Tsamalashvili, L., Kaladze, D., Ozcan, O., Yesil, A., Inc, M. Modified KdV equation for magnetized Rossby waves in a zonal flow of the ionospheric E-layer, *Physics Letters A* 2019; 383 (32): 125888
- [23] Richard, F. *The Physics of Plasma*, CRC press, New York, 2014.





## **Editör Düzeltme Notu**

Çağla DURMAZ, Burak SENGOZ, Derya KAYA ÖZDEMİR, Ali TOPAL, Ali ALMUSAWI tarafından dergimizin Cilt: 32 - Sayı: 2 Yıl 2020 Sayfalar : 541-548 baskısında yayınlanan “Bitümlü Sıcak Karışımların Laboratuvar Ortamında Yaşlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması” başlıklı makalenin ilk sayfasında yer alan sayı bilgisi sehven (1) olarak yazılmıştır. İlgili makalenin APA standardı için örnek kaynak gösterimi aşağıdaki gibidir.

Durmaz, Ç , Sengoz, B , Kaya Özdemir, D , Topal, A , Almusawı, A . (2020). Bitümlü Sıcak Karışımların Laboratuvar Ortamında Yaşlandırma Yöntemlerinin Karşılaştırılması . Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 32 (2) , 541-548 . DOI: 10.35234/fumbd.731778





## 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.