

# NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 11 Sayı: 2 2022

Volume: 11 Issue: 2 2022



[www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi](http://www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi)  
[www.ohu.edu.tr/facultyofengineering](http://www.ohu.edu.tr/facultyofengineering)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>  
<https://dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh>



**Dergi Sahibi/Journal Owner**

Prof. Dr. Hasan Uslu

**Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekan Vekili, Türkiye/  
Niğde Ömer Halisdemir University, Acting Dean of Engineering Faculty, Turkey**

**Baş Editör/Editor-in-Chief**

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

**Yardımcı Editörler/Associate Editors**

Prof. Dr. Mustafa Korkaç

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Doç. Dr./*Assoc. Prof. Dr.* Firdevs Uysal

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Dr. Öğr. Üyesi/*Assist. Prof. Dr.* Ahmet Şakir Dokuz,

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*



**Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board**

Prof. Dr. Adnan Görür

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Metin Yıldırım

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Murat Gökçek

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/*Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey*

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye/*Yıldırım Beyazıt University, Turkey*

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/*Hubei University University of Hubei, China*

Prof. Dr. Ceyhun Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/*Pamukkale University, Turkey*

Prof. Dr. Cengiz Duran Atış

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Okan Karahan

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Mustafa Alçı

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Kenan Danışman

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/*Erciyes University, Turkey*

Prof. Dr. Kezban Candoğan

Ankara Üniversitesi, Türkiye/*Ankara University, Turkey*

Prof. Dr. Mustafa İlbaş

Gazi Üniversitesi, Türkiye/*Gazi University, Turkey*

Prof. Dr. Farid Abed

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Ghassan Abu-Lebdeh

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Serter Atabay

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Doç. Dr. Kazi Fattah

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./*Sharjah American University, U.A.E.*

Prof. Dr. Süreyya Meriç Pagano

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Türkiye/*Tekirdağ Namık Kemal University, Turkey*

Prof. Dr. Filipe Figueiredo

Aveiro Üniversitesi, Portekiz/*Aveiro University, Portugal*



### Editör Kurulu/ Editorial Board

- |   |  |
|---|--|
| Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir<br>(Baş Editör/Editor-in-Chief)     | İnşaat Mühendisliği<br><i>Civil Engineering</i>                                |
| Prof. Dr. Mustafa Korkaç<br>(Yardımcı Editör/Co-Editor)         | Jeoloji Mühendisliği<br><i>Geological Engineering</i>                          |
| Doç. Dr. Firdevs Uysal<br>(Yardımcı Editör/Co-Editor)           | İnşaat Mühendisliği<br><i>Civil Engineering</i>                                |
| Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Şakir Dokuz<br>(Yardımcı Editör/Co-Editor) | Bilgisayar Mühendisliği<br><i>Computer Engineering</i>                         |
| Prof. Dr. Fehiman Çiner   | Çevre Mühendisliği<br><i>Environmental Engineering</i>                         |
| Prof. Dr. Hakan Erdem   | İnşaat Mühendisliği<br><i>Civil Engineering</i>                                |
| Prof. Dr. Saffet Ayasun   | Elektrik-Elektronik Mühendisliği<br><i>Electrical Electronics Engineering</i>  |
| Prof. Dr. Zeliha Yıldırım                                       | Gıda Mühendisliği<br><i>Food Engineering</i>                                   |
| Prof. Dr. Yonca Yüceer  | Gıda Mühendisliği<br><i>Food Engineering</i>                                   |
| Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan                                | Endüstri Mühendisliği<br><i>Industrial engineering</i>                         |
| Prof. Dr. Murat Barut   | Elektrik-Elektronik Mühendisliği<br><i>Electrical Electronics Engineering</i>  |
| Prof. Dr. Maciej Dutkiewicz                                     | İnşaat Mühendisliği<br><i>Civil Engineering</i>                                |
| Prof. Dr. Seval Kutlu Akal Solmaz                               | Çevre Mühendisliği<br><i>Environmental Engineering</i>                         |
| Prof. Dr. Bora Timurkutluk                                      | Makine Mühendisliği<br><i>Mechanical Engineering</i>                           |
| Prof. Dr. Ali Özgün Ok  | Geomatik Mühendisliği<br><i>Geomatics Engineering</i>                          |
| Doç. Dr. Yasin Kabalıcı   | Elektrik-Elektronik Mühendisliği<br><i>Electrical Electronics Engineering</i>  |
| Doç. Dr. Kutalmış Gümüş   | Harita Mühendisliği<br><i>Geomatics Engineering</i>                            |
| Doç. Dr. Aydın Yeşildirek                                       | Mekatronik Mühendisliği<br><i>Mechatronics Engineering</i>                     |
| Doç. Dr. Serkan Çayırılı  | Maden Mühendisliği<br><i>Mining Engineering</i>                                |
| Doç. Dr. Rahim Hassanzadeh                                      | Makine Mühendisliği<br><i>Mechanical Engineering</i>                           |
| Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad                               | İnşaat Mühendisliği<br><i>Civil Engineering</i>                                |
| Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı                           | Üretim Mühendisliği<br><i>Manufacturing Engineering</i>                        |
| Dr. Öğr. Üyesi Casen Panaitescu                                 | Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği<br><i>Perolium and Natural Gas Engineering</i> |





### Mizanpaj Editörleri/Composition Layout Editors

Arş. Gör. Alper Ecemiş	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>
Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Arş. Gör. Emre Uçar	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Arş. Gör. Katibe Sinem Coruk	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>

### İngilizce Dil Editörleri/English Language Editors

Doç. Dr. Fatih Çelik	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hande Baltacıoğlu	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ömer Genç	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Recep Yıldız	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>

### Türkçe Dil Editörleri/Turkish Language Editors

Doç. Dr. Hasan Erhan Yücel	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Doç. Dr. Hasan Tangüler	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hamdi Muratçobanoğlu	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>



### Yazışma Adresi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Koordinatörlüğü, 51240 Niğde/Türkiye

### Correspondence Address

Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences Publishing Coordinatorship, 51240 Niğde/Turkey

E-posta/E-mail: [mbergisi@ohu.edu.tr](mailto:mbergisi@ohu.edu.tr)

İnternet sayfası/Web page: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>

### Dergi Bilgisi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NÖHÜ) Mühendislik Bilimleri Dergisi, NÖHÜ Mühendislik Fakültesi tarafından 2012 yılından beri Türkçe veya İngilizce olarak yazılmış Orijinal Araştırma Makaleleri ve Derleme Makaleleri yayınlayan hakemli bir dergidir. Dergi, hiçbir aşamada yayın ücreti talep etmemektedir ve DergiPark sistemi üzerinden ücretsiz erişimli bir dergidir.

### Publication information

Niğde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences is a peer-reviewed journal that has published Original Research Articles and Review Articles written in Turkish or English since 2012 by NOHU Faculty of Engineering. The journal does not require any publication fee at any stage and is a free access journal from the DergiPark system.

## Özetlenme, Dizinlenme/Abstracting, Indexing



## Erişilebilirlik /Accessibility





## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

### **Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Hastane atıksularının ekotoksikolojik etkisinin değerlendirilmesi

*Evaluation of ecotoxicological effect of hospital wastewater*

**Arzu Ulvi, Senar Aydın, Mehmet Emin Aydın**

239-245

Araştırma Makalesi/Research Article

Arazi kullanımının sulak alandan tarıma dönüştürülmesinin bazı toprak özellikleri üzerindeki etkileri ve bunların toprak derinliği ile değişimi

*The effects of land use conversion from marshland to farmland on some soil properties and their changes with soil depth*

**Selma Yaşar Korkaç, Mustafa Korkaç, Muhammet Hüseyin Mert, Abdurrahman Geçili, Yusuf Serengil**

246-257

### **Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Kaskat bir sistemin FTR sönümlenmeli kanallarda HQAM performans analizi

*Performance analysis of HQAM for a cascaded system over FTR fading channels*

**Caner Özen, Mehmet Bilim**

258-263

Araştırma Makalesi/Research Article

TETRA baz istasyonları arasında frekans planlaması

*Frequency planning between TETRA base stations*

**Şakir Yılmaz, Çağatay Aydın, Doğu Çağdaş Atilla**

264-270

### **Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Sürdürülebilir işgücü çizelgeleme ve rotalama probleminin değişken komşu arama algoritmasıyla çözümü: Samsun örneği

*The Sustainable workforce scheduling and routing problem with variable neighbourhood search algorithm: The case of Samsun*

**Mehmet Erdem**

271-280

Araştırma Makalesi/Research Article

Kümeleme analizi ile konut seçimi sürecinde deprem riski tabanlı bir yaklaşım önerisi

*Suggestion for a earthquake risk-based approach in the housing selection process with cluster analysis*

**Furkan Dışkaya, Şenol Emir**

281-293

Research Article /Araştırma Makalesi

A study on strategy development for e-commerce businesses with clustering and spherical fuzzy analytic hierarchy process

*Kümeleme ve küresel bulanık analitik hiyerarşi süreci ile e-ticaret işletmeleri için strateji geliştirme üzerine bir çalışma*

**Serap Tepe, Serkan Eti**

294-302

**Gıda Mühendisliği / Food Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Çekirdeksiz kuru zeytin kalite özellikleri üzerine ultrason, dondurma ve kurutma işlemlerinin etkileri

*The effects of ultrasound, freezing and drying on the quality characteristics of pitted dried olives*

**Melisa Özçelik, Alev Yüksel Aydar, Tuncay Yılmaz**

303-313

**İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Karayolu esnek yol üstyapılarında görülen yüzey bozulma türlerinin sürüş konforuna etkilerinin değerlendirilmesi

*Evaluation of the effects of surface distress types observed in the flexible road pavements on the ride comfort*

**Ufuk Kırbaş, Mustafa Kardeş**

314-325

Araştırma Makalesi/Research Article

Kubbe yapı formlarının kenet ile güçlendirilmesi

*Strengthening of dome type structures with clamps*

**Fatih Kürşat Fırat, Şükran Tanrıverdi, Ali Ural, Mehmet Emin KARA**

326-334

Araştırma Makalesi/Research Article

Süper emici polimer katkılı alkaliyle aktive edilen geopolimer harçların özellikleri

*Properties of super absorbent polymer added alkali activated geopolymer mortars*

**Umur Korkut Sevim, Müzeyyen Balçıklı Bankir, Büşra Sinem Genç**

335-347

Araştırma Makalesi/Research Article

Asfalt karışımların termal iletkenliklerinin değerlendirilmesi

*Evaluation of the thermal conductivities of asphalt mixtures*

**Nurgül Şirin, Erol İskender, Atakan Aksoy, Mustafa Taha Aslan, Cansu İskender**

348-355



Araştırma Makalesi/Research Article

Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı bisiklet yolu güzergâhı araştırması

*Geographical information systems based cycle route research*

**Ahmet Atalay, İbrahim Say**

356-362

### **Kimya Mühendisliği / Chemical Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Acid red-20 sentetik endüstriyel boyar maddenin elektro-oksidasyon yöntemi ile sulu çözeltiden uzaklaştırılması

*Removal of acid red-20 synthetic industrial dyestuff from aqueous solution by electro oxidation method*

**Jülide Erkmen, Mahmut Adıgüzel**

363-371

### **Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

ÜPMY tabanlı kafes yapılarının SLE yöntemi ile üretiminde boyut hassasiyetinin incelenmesi

*Investigation of dimensional accuracy in the production of TPMS-based lattice structures by SLM method*

**Erkan Bahçe, Ender Emir, Mehmet Sami Güler**

372-378

Araştırma Makalesi/Research Article

AISI 304 paslanmaz çelik talaşlı şekil verme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimini azaltmaya yönelik istatistiksel yaklaşım

*Statistical approach to reducing the surface roughness and power consumption in machining of AISI 304 stainless steel*

**Mehmet Safa Bodur**

379-386

Research Article /Araştırma Makalesi

Investigation of material models on deep drawing and ironing processes

*Derin çekme ve ütüleme proseslerinde malzeme modellerinin incelenmesi*

**Cihangir Kaplan, Cem Güleç, Mesut Arıkoğlu, Serkan Toros, Habip Gökay Korkmaz**

387-392

Araştırma Makalesi/Research Article

İki tekerlekli denge robotunun PID ile kontrolü

*Control of two wheel balance robot with PID*

**Güçhan Taşlıalan, Orhan Erdal Akay**

393-403

Araştırma Makalesi/Research Article

Kol-kızak mekanizması dinamiğinin deneysel analizi

*Experimental analysis of dynamics of inverted slider-crank mechanism*

**Çağlar Sevim, İbrahim Uzman**

404-409



Araştırma Makalesi/Research Article

AISI 304 paslanmaz sac malzemenin lazerle işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak yüksekliğine etkisinin araştırılması

*Investigation the effect of cutting parameters on surface roughness, kerf width and dross height in laser processing of AISI 304 stainless sheet material*

**İbrahim Cebeci, Barış Özlü, Halil Demir**

410-415

**Malzeme ve Metalürji Mühendisliği / Materials and Metallurgical Engineering**

Araştırma Makalesi/Research Article

Berilyum bakır alaşımında akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların aşınma performansı

*Wear performance of electroless Ni-P and Ni-B coatings on beryllium copper alloy*

**Ferda Mindivan, Harun Mindivan**

416-422

Araştırma Makalesi/Research Article

Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışına alüminyum ilavesinin ve östemperleme ısı işleminin etkilerinin incelenmesi

*Investigation of the effects of aluminum addition and austempering heat treatment on wear behavior of ductile cast irons*

**Rıdvan Gecü**

423-430

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı barit cevherlerinin konvansiyonel değirmenlerde bazı öğütme özelliklerinin belirlenmesi

*Determination of the some grinding properties of different barite ores by conventional mills*

**Güler Bayar, Meftuni Yekeler**

431-438

Research Article /Araştırma Makalesi

The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites

*Jüt/karbon elyaf takviyeli hibrit kompozitlerde farklı tip matris malzeme kullanımının mekanik karakteristiklere etkisi*

**Berkay Karacor, Mustafa Özcanlı**

439-448

**Diğer / Other**

Derleme Makalesi/Review Article

Bitki doku kültürlerinde ince hücre tabaka (TCL) kültür sistemi

*Thin cell layer (TCL) culture system in plant tissue cultures*

**Halide Hande Güngör, Meltem Bayraktar, Aynur Gürel**

449-460



## Hastane atıksularının ekotoksikolojik etkisinin değerlendirilmesi Evaluation of ecotoxicological effect of hospital wastewater

Arzu Ulvi<sup>1,\*</sup> , Senar Aydın<sup>2</sup> , Mehmet Emin Aydın<sup>3</sup> 

<sup>1,2</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

<sup>3</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada Konya’da bulunan yatak kapasiteleri 27-600 kişi arasında değişen 10 hastanenin atıksuyundan yaz ve kış dönemlerinde örnekler alınarak fizikokimyasal özellikleri belirlenmiş ve *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna*, *Lepidium sativum* toksisite testleri ile ekotoksikolojik etkisi belirlenmiştir. Hastane atıksularının pH, elektriksel iletkenlik, askıda katı madde ve toplam organik karbon parametreleri sırasıyla yaz dönemi için 7.16-8.61, 525-7970  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 18-1124 mg/L, 53-502 mg/L aralığında, kış döneminde ise 7.10-8.63, 554-4130  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 92-860 mg/L, 20-305 mg/L, 143-819 mg/L aralığında tespit edilmiştir. Hastane atıksularının  $\text{EC}_{50}$  değerleri yaz döneminde *Vibrio fischeri* için 0.39-77.72, *Daphnia magna* için 14.84-85.15, *Lepidium sativum* için 16.62-87.68 aralığında, kış döneminde *Vibrio fischeri* için 0.78-100, *Daphnia magna* için 9.8-49.95, *Lepidium sativum* için 36.68-42.61 aralığında tespit edilmiştir.  $\text{EC}_{50}$  değerlerinden hesaplanan toksik birim değerleri incelendiğinde, araştırılan hastanelerin üçünün atıksuyunda yüksek akut toksisite etkisi gözlenmiştir. Covid-19 pandemisi sebebiyle hastanelerin tam kapasite çalışması ve hastanelerde yoğun farmasötik kullanımına bağlı olarak deşarj edilen kirlilik yükünün artması hastane atıksularının yönetimi açısından bugün daha önemli bir sorun haline gelmiştir. Hastane atıksularının deşarj kriterlerinin belirlenmesinde toksisite testlerinden faydalanılmalıdır.

**Anahtar kelimeler:** Fizikokimyasal özellikler, Hastane atıksuyu, Toksisite

### 1 Giriş

Hastaneler ortalama olarak günde 1000 L/gün yatak atıksu üretirler [1]. Hastanelerin yatak kapasitesi ve ayakta tedavi kapasitelerine göre atıksu debileri değişebilir. Hastanelerde bulunan tıbbi birimlerin çeşitlerine, uygulanan tedavi yöntemlerine, gerçekleştirilen çeşitli faaliyetlere, coğrafi konuma ve mevsime bağlı olarak oluşan atıksular farklı bileşimlere sahip olabilirler [2-3]. Hastane atıksuları kalıcı organik kimyasallar, kompleks karışık organik maddeler, deterjanlar, sürfaktanlar, antiseptikler, solventler, radyoaktif maddeler ve farmasötikler içeren atıksulardır [4]. Hastane atıksularında konvansiyonel kirletici parametreler (Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), askıda katı madde (AKM) evsel atıksulardan 2-3 kat daha fazla olabilirler. Mikrokirleticiler ise hastane

### Abstract

The wastewater of 10 hospitals in Konya with bed capacities ranging from 27-600 person in summer and winter periods. The pH, electrical conductivity, suspended solids and total organic carbon properties of hospital wastewaters are 7.16-8.61, 525-7970  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 18-1124 mg/L, 53-502 mg/L in the summer period, and 7.10- 8.63, 554-4130  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 92-860 mg/L, 20-305 mg/L, 143-819 mg/L in the winter period. The  $\text{EC}_{50}$  values of hospital wastewater are 0.39-77.72 for *Vibrio fischeri*, 14.84-85.15 for *Daphnia magna*, 16.62-87.68 for *Lepidium sativum* in summer, 0.78-100 for *Vibrio fischeri*, 9.8-49.95 for *Daphnia magna*, 36.68-42 for *Lepidium sativum* in winter. When the toxic unit values calculated from the  $\text{EC}_{50}$  values were examined, high acute toxicity was observed in the wastewater of three of the hospitals studied. The increase in the discharged pollution load due to the full capacity operation of the hospitals and the insentive use of pharmaceuticals in hospitals due to the Covid-19 pandemic has become a more important problem in terms of the management of hospital wastewater. Toxicity tests should be used to determine the discharge criteria of wastewater such as hospital wastewater.

**Keywords:** Physicochemical properties, Hospital wastewater, Toxicity

atıksularında evsel atıksulara göre 2-150 kat daha yüksek konsantrasyonlarda olabilirler [5]. Hastane atıksuları ile ilgili endişe verici önemli kirletici gruplarından bir tanesi farmasötiklerdir. Farmasötikler biyolojik yapılara etki eden, dirençli, kalıcı ve zararlı mikrokirleticilerdir. Konya’da bulunan hastane atıksularının farmasötik konsantrasyonları ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, 16 adet hastanede antibiyotiklerin konsantrasyonu yaz döneminde  $21.2 \pm 0.13-4886 \pm 3.80$  ng/L, kış döneminde ise  $497 \pm 3.66- 322,735 \pm 4.58$  ng/L olarak tespit edilmiştir. Çevresel risk değerlendirmesi sonuçlarına göre ise kışın arıtma tesisi çıkış suyunda azithromycin ve clarithromycin bileşiklerinin alıcı ortamda akuatik organizmalar alg ve balık için yüksek risk (RQ > 10) sergilediği tespit edilmiştir [6]. Analjezik ve anti-inflamatuarların konsantrasyonları yaz döneminde 1043-

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: atekinay@erbakan.edu.tr (A. Ulvi)

Geliş / Received: 26.11.2021 Kabul / Accepted: 08.01.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1028824

203187 ng/L, kış döneminde 2347-300285 ng/L olarak tespit edilmiştir [7]. Bu çalışmalarda bazı farmasötik bileşiklerin atıksuda bulunmasının balık, *Daphnia magna* ve alg için yüksek risk oluşturduğu tespit edilmiştir. Hastane atıksuları genelde belediyelerin kanalizasyon sistemlerine herhangi bir ön arıtıma tabi tutulmadan deşarj edilirler. Deşarj edilen hastane atıksularının debisine de bağılı olarak atıksu arıtma tesisine ulaşan kirlilik yüklerinde artış görülebilir. Hastane atıksularının şehrin kanalizasyon sistemine veya çevresel ortamlara deşarj edilmesi durumunda içerdiği kirleticilerin çevresel etkilerinin bilinmesi gerekmektedir. Çok çeşitli bir yelpazede çevresel kirleticiler içeren hastane atıksularında her bir kirletici için ayrı ayrı değerlendirme yapmak zor ve neredeyse imkansızdır. Bu sebeple atıksu içerisindeki bütün kirleticilerin ortak etkisini belirleyebilmek için toksisite testleri önemlidir [2,4,8].

Bu çalışmada Konya’da bulunan 10 tane hastaneden yaz ve kış dönemlerinde atıksu örnekleri alınmıştır. Hastane atıksularının fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir. 3 farklı trofik seviyeyi temsil eden *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna*, *Lepidium sativum* toksisite testleri ile EC<sub>20</sub> (organizmaların %20’sini etkileyen konsantrasyon) ve EC<sub>50</sub> (organizmaların %50’sini etkileyen konsantrasyon) değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar toksik birim değerlerine dönüştürülerek ekotoksikolojik risk değerlendirilmiştir.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Atıksu örnekleri

Konya’da bulunan 10 hastaneden 2016 yılında yaz ve kış dönemlerinde atıksu örnekleri alınmıştır. İncelenen hastanelerden 9 tanesi özel hastanedir ve yatak kapasiteleri 27-201 kişi arasındadır, 1 tanesi devlet hastanesidir ve yatak kapasitesi 600 kişidir. Hastane atıksu örnekleri hastanenin kanalizasyon sistemine bağlantı noktasından 2 saatlik kompozit örnekler olarak alınmıştır.

### 2.2 Atıksu örneklerinin fizikokimyasal analizleri

Atıksu örneklerinin pH ve Eİ (Elektriksel iletkenlik) ölçümleri Hach marka portatif model pH ve Eİ ölçüm cihazı ile atıksu örnekleri alındıktan sonra gerçekleştirilmiştir. AKM ve toplam organik karbon (TOK) ölçümleri Standart Metotlara göre [9] gerçekleştirilmiştir.

### 2.3 Toksisite testleri

Hastane atıksularının ekotoksikolojik etkisi test organizması olarak *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* ve *Lepidium sativum*’un kullanıldığı toksisite testleri ile değerlendirilmiştir. *Vibrio fischeri* ve *Daphnia magna* toksisite testleri su ortamındaki canlı yaşamına olan etkiyi belirlemek için, *Lepidium sativum* toksisite testi ise fitotoksik etkinin belirlenmesi için seçilmiştir. Luminescent bakterinin kullanıldığı *Vibrio fischeri* toksisite testi besin zincirinde ayrıştırıcı trofik seviyesini, *Daphnia magna* birincil tüketici trofik seviyesini, *Lepidium sativum* ise üretici trofik seviyesini temsil etmektedir. *Vibrio fischeri* ve *Daphnia magna* toksisite testleri akut etkiyi değerlendirirken, *Lepidium sativum* toksisite testi ile kronik etki belirlenmektedir. Toksisite testleri gerçekleştirilmeden önce test organizmalarının duyarlılığını ve test

performansının doğruluğunu kontrol etmek için *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* ve *Lepidium sativum* ile referans toksisite testleri gerçekleştirilmiştir. Referans testlerde K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> solüsyonları kullanılmıştır.

#### 2.3.1 *Vibrio fischeri* (luminescence bacteria) toksisite testi

*Vibrio fischeri* toksisite testi EN ISO 11348-2 (Luminescent bacteria test kit)’e Hach-Lange LCK 482 ile Dr. Lange LUMISTox 300 luminometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. *Vibrio fischeri* toksisite testinin test kriteri luminescence inhibisyonu olup, test prensibi ise luminometre ile luminescence azalmasının ölçülmesidir. Numunelerin toksisitesi Dr. Lange photobacterium phosphoreum standart kültürünün 30 dakika sonrasındaki ışık yoğunluğunun azalması yoluyla tespit edilmiştir. Atıksu örneklerinin seyrelme serisi EN ISO 11348-2’ye [10] göre doğrudan test vialleri içerisinde hazırlanmış ve G1 (G1≈%100) ölçüm metodu kullanılmıştır. I0 ve I30 ölçümleri esnasında LUMISoft4 yazılım programı ile renk düzeltilmesi yapılmıştır. Atıksuların %inhibisyon ve EC<sub>50</sub> değeri EN ISO 11348-2’ye göre hesaplanmıştır. Analizler 2 tekrar olarak gerçekleştirilmiştir.

#### 2.3.2 *Daphnia magna* toksisite testi

*Daphnia magna* biotesti mikrobiotest Daphtox F<sup>TM</sup> Standart Prosedürüne göre gerçekleştirilmiştir. *Daphnia magna* toksisite testinin test kriteri *Daphnia magna*’ların ölümü, test prensibi ise mikroskop altında ölü ve yaşayan crustacean sayımıdır. Tuz çözeltileri (NaHCO<sub>3</sub>, CaCl<sub>2</sub>, MgSO<sub>4</sub>, KCl) kullanılarak standart çözelti hazırlanmış ve hazırlanan bu çözelti larvaların inkübasyonuna bırakılmasından ve numune seyrelme serilerinin hazırlanmasından önce en az 15 dakika süresince havalandırılmıştır. *Daphnia magna* larvalarının yumurtadan çıkartılması için 15 mL havalandırılmış standart çözelti ile tüp içerisinde yer alan larvalar petri tabağına transfer edilmiş ve 72 saat süresince, 20-22 °C’de sürekli olarak 11000 lux ışık altında inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyondan 70 saat sonra (teste başlamadan 2 saat önce) yumurtadan çıkan daphnialar spirulina mikro-alg tüpüne 1 mL havalandırılmış standart çözelti konularak hazırlanan besin çözeltisi ile beslenmiştir. Farklı seyrelmeler ve kontrol için test dört tekrar olarak gerçekleştirilmiştir. Test tabağındaki her bir hücreye 10 mL atıksu örnekleri konulmuştur. Her atıksu örneğinin içerisine 5’er adet *Daphnia magna* larvası konularak, karanlıkta 20 °C’de inkübe edilmiştir. 24 ve 48 saat sonunda ölü *Daphnia magna*’lar sayılarak % inhibisyon oranı belirlenmiş ve grafiksel interpolasyonla EC<sub>50</sub> değeri hesaplanmıştır.

#### 2.3.3 *Lepidium sativum* toksisite testi

*Lepidium sativum* toksisite testinin test kriteri ve test prensibi bitki kök uzunluğunun ölçülmesidir. Test 6 adet kontrol ve 3’er adet farklı seyrelmelerde hazırlanan atıksu örnekleri için gerçekleştirilmiştir. Kontrol ve seyrelme serilerinin hazırlanması için saf su kullanılmıştır. 9 cm’lik cam petri kapları içerisine 2’şer adet 90 mm çapında filtre kağıdı yerleştirilmiştir. Kontrol petri kaplarına 5’er mL saf su, numune petrilere ise hazırlanan farklı seyrelmelerdeki numuneden alınarak filtre kağıdı altında hiç hava kabarcığı



kalmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Üzerlerine eşit büyüklükte, zarar görmemiş *Lepidium sativum* tohumlarından 25'er adet petri kabı içerisinde eşit aralıklarla dağıtılmış ve ağızları kapatılan petri kapları 72 saat süresince karanlık ortamda, 25°C sıcaklıkta inkübe edilmiştir. Test süresi sonunda her petri kabında bulunan *Lepidium sativum* tohumlarının en iyi gelişim gösteren 20 tanesinin kök uzunlukları ölçülmüştür. Test süresi sonunda her bir numune seyrelmesindeki *Lepidium sativum* tohumlarında gözlemlenen kök uzunluk ortalama değerleri kontrol petri kaplarında ölçülen ortalama kök uzunluk değerleri ile kıyaslanarak % inhibisyon oranı ve EC<sub>50</sub> değeri belirlenmiştir [11].

### 3 Sonuçlar

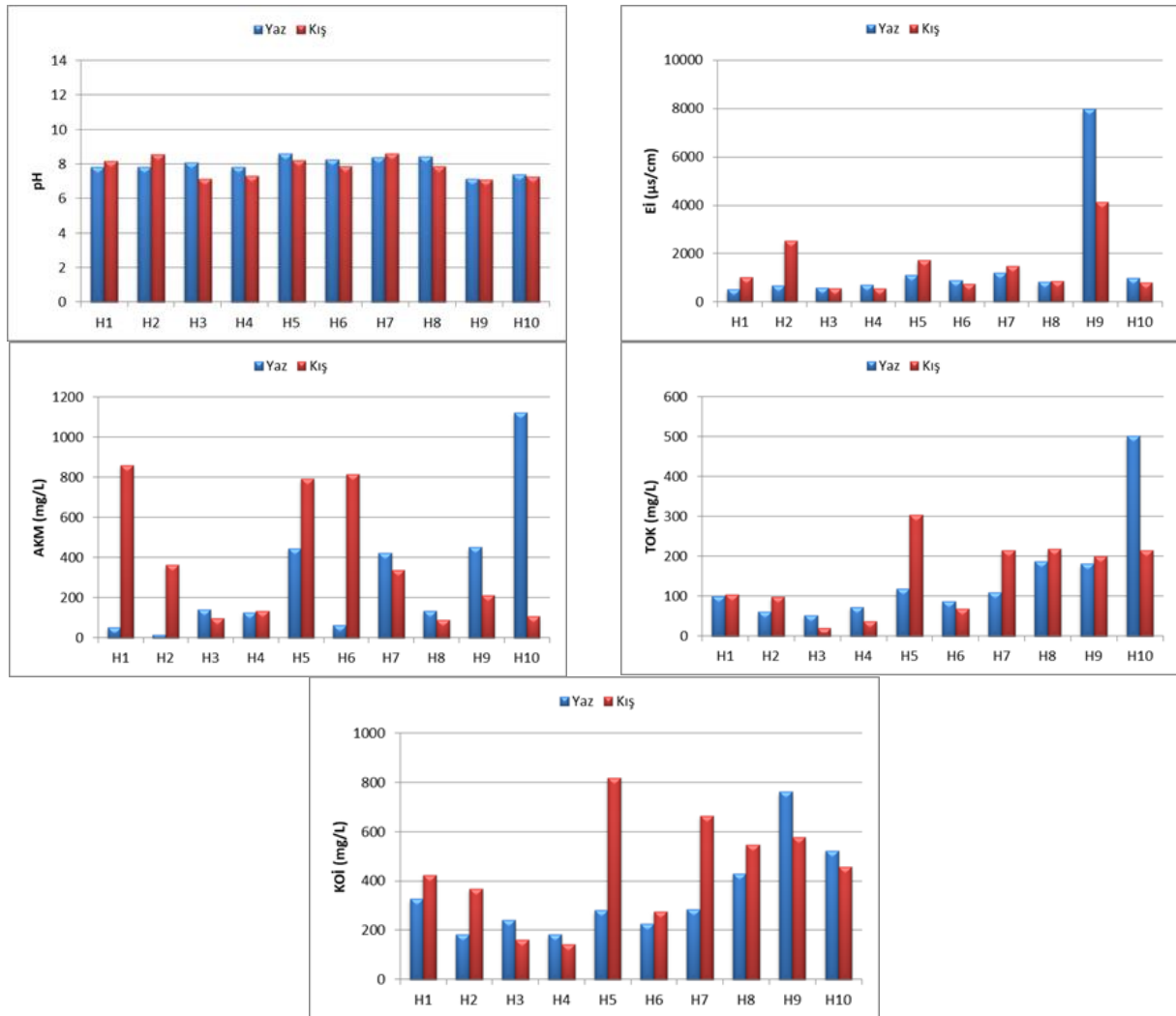
#### 3.1 Fizikokimyasal analizlerin sonuçları

Şekil 1'de hastane atıksularının fizikokimyasal özellikleri verilmiştir. İncelenen hastanelerin pH değerleri 7.10-8.63 arasında değişmektedir. Yaz ve kış dönemlerinde ölçülen pH değerlerinde farklılık gözlenmemiştir. Eİ değerleri 525-7970 µs/cm aralığında değişmektedir. 600 adet yatak kapasitesi olan H9 hastanesinin Eİ değerinin diğer

hastanelere göre yüksek tespit edildiği görülmektedir. Hastane atıksularının AKM değerleri 18-1124 mg/L aralığında tespit edilmiştir. H1, H2, H4, H5, H6 hastanelerinin AKM değerleri yaz mevsiminde diğer hastanelerin kış mevsiminde yüksek çıkmıştır. Hastane atıksularının TOK ve KOİ değerleri sırası ile 63-502 mg/L, 143-819 mg/L aralığında tespit edilmiştir.

KOSKİ (Konya Su ve Kanalizasyon İdaresi) Genel Müdürlüğü Atıksuların Kanalizasyon Şebekesine Deşarj Yönetmeliğ'inde pH için 6-10, AKM için 400 mg/L, KOİ için 1000 mg/L olmak üzere limit değerler belirlenmiştir. Hastane atıksularının KOİ ve pH değerlerinin deşarj standartlarını aşmadığı, AKM değerinin ise yazın dört, kışın üç hastaneden alınan örnekte deşarj standardını aştığı görülmektedir.

Tablo 1'de hastane atıksularının literatür çalışmalarında ve bu çalışmada elde edilen fizikokimyasal özellikleri verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında literatürde tespit edilen değerler ile pH değerinin benzer olduğu, Eİ değerinin daha yüksek tespit edildiği, AKM ve KOİ değerinin literatür çalışmalarında da geniş bir aralıkta değiştiği, TOK değerinin daha yüksek tespit edildiği görülmüştür.



Şekil 1. Hastane atıksularının fizikokimyasal özellikleri

**Tablo 1.** Hastane atıksularının fizikokimyasal özellikleri

Atıksu türü	pH	Eİ (µS/cm)	AKM (mg/L)	TOK (mg/L)	KOİ (mg/L)	Kaynak
Hastane atıksuyu	-	-	160	-	500	[5]
Hastane atıksuyu	-	-	225	160	855	[12]
Hastane atıksuyu	7.4-8.7	-	67-339	-	375-2464	[13]
Hastane atıksuyu	7.8±0.1	-	1023±560	-	414±253	[14]
Hastane atıksuyu	8.1-8.3	1194-1455	6.1-11.1	153.3-261.2	357-490	[15]
Hastane atıksuyu, Kocaeli	8.1±0.7	-	228±65	276±155	807±325	[16]
Hastane atıksuyu, Sivas	6.3-7.6	-	49-190	-	188-535	[17]
Hastane atıksuyu, Konya	6.1-7.9	-	27-2740	-	161-1923	[18]
Hastane atıksuyu, Eskişehir	6.3-7.7	-	71-496	-	317-1786	[19]
<b>Hastane atıksuyu, Konya</b>	<b>6.5-8.6</b>	<b>525-7970</b>	<b>18-1218</b>	<b>20-502</b>	<b>143-819</b>	<b>Bu çalışma</b>

### 3.2 Ekotoksikolojik etkinin değerlendirilmesi

*Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* ve *Lepidium sativum* toksisite testleri test organizmalarının duyarlılığını ve test performansının doğruluğunu kontrol etmek için farklı konsantrasyonlarda  $K_2Cr_2O_7$  ile referans testler gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de referans test sonuçları verilmiştir.

**Tablo 2.** Referans test EC<sub>50</sub> değerleri (mg/L)

$K_2Cr_2O_7$	<i>Daphnia magna</i>		<i>Vibrio fischeri</i>	<i>Lepidium sativum</i>
	24 sa*	48 sa	30 dak**	72 sa***
	1.85	1.20	42	14

\* ISO 6342’e göre 24 h EC<sub>50</sub> kabul edilebilir aralık 0.6-2.1 mg/L. 48 sa için değer tanımlanmamıştır.

\*\* DIN EN ISO 11348-2’ e göre 4.0 mg/L için inhibisyon %40.

\*\*\* Değer tanımlanmamıştır.

Yaz ve kış döneminde hastanelerden alınan atıksu örneklerinin EC<sub>20</sub> ve EC<sub>50</sub> değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3 incelendiğinde, *Daphnia magna* toksisite testinde yaz döneminde H6 ve H10 numaralı hastanelerde, kış döneminde H5, H8, H10 numaralı hastanelerde yüksek

toksosite görülmüştür. *Vibrio fischeri* toksisite testinde yaz döneminde H7 numaralı hastanede, kış döneminde H5 ve H8 numaralı hastanelerde yüksek toksisite tespit edilmiştir. *Lepidium sativum* toksisite testi incelendiğinde yaz döneminde H7 numaralı hastanede yüksek toksisite görülmüştür, kış için sadece iki hastane de EC<sub>50</sub> değeri tespit edilmiştir. Yaz döneminde hastane atıksuları açısından *Daphnia magna* test organizmasının daha hassas olduğu, sonrasında ise *Lepidium sativum* ve *Vibrio fischeri* test organizmalarının hassas olduğu görülmektedir. Kış döneminde ise *Daphnia magna* test organizmasının hastane atıksularından en çok etkilenen test organizması olduğu, *Vibrio fischeri* ve *Lepidium sativum* toksisite testlerinin sırasıyla onu takip ettiği görülmektedir. *Daphnia magna* toksisite testinde maruziyet süresi arttıkça toksisitenin arttığı görülmüştür. Atıksu örneklerinin EC<sub>50</sub> değerlerinden toksik birim (TB) değerleri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$TB = 100 * (1/EC_{50}) \quad (1)$$

Elde edilen toksik birim değerleri Tablo 4’de verilen akut toksisite sınıflandırmasına göre değerlendirilmiştir.

**Tablo 3.** Atıksu örneklerinin EC<sub>20</sub> ve EC<sub>50</sub> değerleri

Örneklem noktaları	Yaz				Kış			
	EC <sub>20</sub>				EC <sub>50</sub>			
	<i>Daphnia magna</i>		<i>Vibrio fischeri</i>	<i>Lepidium sativum</i>	<i>Daphnia magna</i>		<i>Vibrio fischeri</i>	<i>Lepidium sativum</i>
	24 sa	48 sa			24 sa	48 sa		
H1	23.9	22.92	72.8	25.69	39.68	38.89	8.33	26.46
H2	28.71	11.27	87.35	25.88	36.18	37.89	12.17	43.18
H3	68.04	30.2	46.22	te	te	50	83.17	27.23
H4	38.68	61.4	15.99	89.01	te	te	67.14	59.09
H5	32.98	31.49	22.64	22.001	0.78	3.04x10 <sup>-16</sup>	3.21	10.45
H6	20.3	2.62	5.97	20.88	26.48	26.48	16.42	25.5
H7	18.09	11.32	3.22	6.56	28.72	18.95	6.21	14.66
H8	19.84	12.82	4.03	16.62	10.15	3.04x10 <sup>-16</sup>	4.26x10 <sup>-5</sup>	21.16
H9	10.61	10.25	4.36	43.3	9.92	9.62	10.84	16.45
H10	1.96	0.048	25.2	98.35	3.12	1.97	8.24	te
	<i>Daphnia magna</i>		<i>Vibrio fischeri</i>	<i>Lepidium sativum</i>	<i>Daphnia magna</i>		<i>Vibrio fischeri</i>	<i>Lepidium sativum</i>
	24 sa	48 sa			24 sa	48 sa		
H1	46.75	43.9	te	te	60.15	57.43	39.88	te
H2	35.35	24.36	te	57.71	54.84	57.43	te	te
H3	te	77.72	te	te	te	100	30.19	te
H4	36.18	54.84	te	te	te	te	te	te
H5	49.99	47.74	te	47.4	2.21	0.78	9.8	36.68
H6	57.43	9.63	39.2	87.68	62.99	62.99	49.95	te
H7	27.42	20.5	14.84	16.62	35.36	28.72	37.07	42.61
H8	30.07	27.7	85.15	te	28.72	0.78	9.27x10 <sup>-3</sup>	te
H9	19.57	18.57	33.19	69.42	17.68	16.87	32.77	te
H10	3.93	0.39	te	te	5.26	3.94	39.16	te

te: tespit edilmedi

**Tablo 4.** Akut toksisite sınıflandırması [20]

Akut toksisite sınıfı	Akut toksisite	
	TB	Toksisite
Sınıf I	Hiçbir testte toksik etki yok	Akut toksisite yok
Sınıf II	< 1	Hafif akut toksisite
Sınıf III	1 – 10	Akut toksisite
Sınıf IV	10 – 100	Yüksek akut toksisite
Sınıf V	≥ 100	Çok yüksek akut toksisite

**Tablo 5.** Hastane atıksularının hesaplanan TB değerleri

Örnekleme noktaları	Yaz			Kış		
	<i>Daphnia magna</i>	<i>Vibrio fischeri</i>	<i>Lepidium sativum</i>	<i>Daphnia magna</i>	<i>Vibrio fischeri</i>	<i>Lepidium sativum</i>
H1	2.28	0	0	1.74	2.51	0
H2	4.11	0	1.73	1.74	0	0
H3	1.29	0	0	1.00	3.31	0
H4	1.82	0	0	0	0	0
H5	2.09	0	2.11	128.21	10.20	2.73
H6	10.38	2.55	1.14	1.59	2.00	0
H7	4.88	6.74	6.02	3.48	2.70	2.35
H8	3.61	1.17	0	128.21	10787.49	0
H9	5.39	3.01	1.44	5.93	3.05	0
H10	256.41	0	0	25.38	2.55	0

Sınıf I	Sınıf III	Sınıf IV	Sınıf V
---------	-----------	----------	---------

Tablo 5’de hastane atıksularının TB değerleri verilmiştir. Akut toksisite sınıflandırılmasına göre incelendiğinde *Daphnia magna* toksisite testi için yaz döneminde bir hastanenin atıksuyu yüksek akut toksisite, bir hastanenin atıksuyu da çok yüksek akut toksisite göstermiştir, kış döneminde bir hastanenin atıksuyu yüksek akut toksisite, iki hastanenin atıksuyu da çok yüksek akut toksisite göstermiştir. *Vibrio fischeri* toksisite testinde yaz döneminde bazı hastane atıksularında akut toksisite gözlenirken, kış döneminde bir hastanede yüksek akut toksisite, bir hastanede çok yüksek akut toksisite gözlenmiştir. *Lepidium sativum* toksisite testinde yaz ve kış dönemlerinde bazı hastane atıksularının akut toksisite gösterdiği belirlenmiştir. Yaz döneminde *Vibrio fischeri* ve *Lepidium sativum* toksisite testlerinde bazı hastane atıksularında akut toksisite olmadığı, kış döneminde yapılan üç toksisite testinde de bazı hastane atıksularında akut toksisite olmadığı görülmüştür.

Aydın ve diğ., [21] Konya’da bulunan yatak kapasiteleri 194-1298 arasında olan altı hastanenin atıksularının toksisitesini incelemiştir. *Daphnia magna* toksisite testinde tüm hastanelerinin toksik etki gösterdiği, *Vibrio fischeri* toksisite testinde iki hastanenin toksik etki gösterdiği, *Lepidium sativum* toksisite testinde ise hastanelerden birinin yüksek toksisite gösterdiği belirlenmiştir. Aydın ve Kara [22] hastane atıksularının da ulaştığı Konya Atıksu Arıtma Tesisi çıkışından numune olarak *Lepites reticulatus* ile balık biyodeneji ve *Lepidium sativum* ile fitotoksisite testleri gerçekleştirmişlerdir. Atıksuyun 72 saatte balıkların yarısının ölmesine neden olan konsantrasyonu LC<sub>50</sub> %41 olarak tayin edilmiştir. *Lepidium sativum* için en yüksek atıksu konsantrasyonlarında çimlenme yüzdesi %83 olarak bulunmuştur. Czech ve diğ., [23] farmasötikleri içeren model atıksu hazırlayarak toksisite testleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuçları çok toksik (EC<sub>50</sub><1mg/L); toksik (1 mg/L<EC<sub>50</sub><10 mg/L); zararlı (10 mg/L<EC<sub>50</sub><100 mg/L) sınıflandırılmasına göre değerlendirmişlerdir. *Daphnia*

*magna* toksisite testi için atıksuyun toksik özellikle olduğunu, *Vibrio fischeri* toksisite testi için zararlı özellikle olduğunu tespit etmişlerdir. Tang ve diğ., [24] hastane atıksularının hareketli yatak biyofilm reaktör ile arıtılmasını incelerken ham atıksuyun ve arıtılan atıksuyun toksisitesini *Vibrio fischeri* toksisite testi ile ölçmüşler ve hastane atıksuyunun arıtım verimini değerlendirmişlerdir. Ham atıksuyun % inhibisyonu %80 iken arıttıktan sonra %50 ölçülmüştür. Cruz-Morato ve diğ., [15] İspanya’da üniversite hastanesinden farklı zaman ve şartlarda aldıkları iki atıksu örneğinin toksisitesini *Vibrio fischeri* toksisite testi ile değerlendirmişlerdir. Örnek bir tanesinin de TB değeri 25, diğerinde ise 2 olarak hesaplanmıştır. TB değerlerini EPA standartlarına göre değerlendirmişler ve *Vibrio fischeri* test organizması için inceledikleri hastane atıksularının toksik kabul edildiğini belirtmişlerdir.

Literatür çalışmalarında görüldüğü gibi hastane atıksularının çevresel etkilerini ve hastane atıksuyuna uygulanan arıtmanın verimini belirlemek için toksisite testlerinde faydalanılmıştır. Literatür çalışmalarında da bu çalışmada olduğu gibi hastane atıksularının alıcı ortam için toksik etki oluşturabileceği sonucuna varılmıştır.

#### 4 Öneriler

Hastane atıksuları çok çeşitli kirleticileri içerebilen atıksulardır. Toksisite testleri atıksuyun içeriğindeki tüm bileşenlerinin sebep olduğu çevresel etki ile ilgili genel bilgi sağlamaktadır. Özellikle farmasötikler gibi dirençli mikrokirleticileri içeren atıksuların toksisite testleri ile toksik etkilerinin değerlendirilmelidir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde hastane atıksularının araştırılan fizikokimyasal özelliklerinden AKM değerinin bazı hastanelerde deşarj standardını aştığı görülmüştür. Yapılan toksisite testlerinin sonuçları incelendiğinde ise hastane atıksularının ayrıştırıcılar ve birincil seviyedeki tüketiciler için yüksek akut toksisite oluşturduğu tespit edilmiştir. Hastane atıksularında bulunan mikrokirleticilerin

çevresel ortamlarda ve canlıların vücutlarında birikim gösterebileceği ve kalıcılıkları da düşünüldüğünde kronik etkilerin de detaylı araştırılması gerekmektedir. 2020 yılında ülkemizde de görülen pandemi şartlarında hastanelere başvuran hasta sayıları ve hastanelerinin doluluk oranlarındaki artış nedeni ile hastane atıksularının kirletici yükleri de artmıştır. Kanalizasyon şebekeleri ile kentsel atıksu arıtma tesislerine ulaşan hastane atıksularında bulunan öncelikli kirleticiler yeterli oranda arıtılmayıp alıcı ortamlara deşarj edilmektedirler. Alıcı ortamlardaki etkilerin belirlenebilmesi için toksisite testleri önemli ve gereklidir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanı Ödülleri (GEBİP) tarafından desteklenmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %11

#### Kaynaklar

- [1] G. Tchobanoglous, F. L. Burton and H. D. Stensel, Wastewater engineering: treatment and reuse. Metcalf & Eddy, Inc., McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2003.
- [2] C.A. Lutterbeck, E.N. Machado, A. Sanchez-Barrios, E.O. Silveira, D. Layton, A. Rieger and E.A. Lobo, Toxicity evaluation of hospital laundry wastewaters treated by microbial fuel cells and constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 729, 138816, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138816>.
- [3] M. Al Aukidy, P. Verlicchi, A. Jelic, M. Petrovic and D. Barcelo, Monitoring release of pharmaceutical compounds: occurrence and environmental risk assessment of two WWTP effluents and their receiving bodies in the Po Valley. Italy. *Science of the Total Environment* 438, 15-25, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.061>.
- [4] D.I. Kern, R.O. Schwaickhardt, G. Mohr, E.A. Lobo, L.T. Kist and E.L. Machado, Toxicity and genotoxicity of hospital laundry wastewaters treated with photocatalytic ozonation. *Science of the Total Environment*, 443, 566-572, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.023>.
- [5] P. Verlicchi, A. Galletti, M. Petrovic and D. Barceló, Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options. *Journal of Hydrology* 389, 416-428, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.005>.
- [6] S. Aydın, M.E. Aydın, A. Ulvi and H. Kiliç, Antibiotics in hospital effluents: occurrence, contribution to urban wastewater, removal in a wastewater treatment plant, and environmental risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 544-558, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3563-0>.
- [7] S. Aydın, M.E. Aydın and A. Ulvi, Monitoring the release of anti-inflammatory and analgesic pharmaceuticals in the receiving environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 36887-36902, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06821-4>.
- [8] G. Jírová, A. Vlčková, M. Wittlerová, M. Dvořáková, L. Kašparová, J. Chrz, K. Kejlová, Z. Wittlingerová, M. Zimová, B. Hošíková, J. Jiravová and H. Kolářová, Toxicity of wastewater from health care facilities assessed by different bioassays, *Neuroendocrinology Letters* 39(6), 441-453, 2018.
- [9] APHA/AWWA/WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17.ed. Washington DC, 1992.
- [10] EN ISO 11348-2, 1998, Water quality – Determination of the inhibitory effect of water samples on the light emissions of *Vibrio fischeri* (Luminescent bacteria test) – Part 2: Method using liquid-dried bacteria, ISO 11348-2: 1998.
- [11] M. Devare and M. Bahadır, Ecotoxicological assessment of inorganic waste disposal in salt mines, part II: Phytotoxicity tests. *Fresenius Environmental Bulletin* 3, 119, 1994.
- [12] A.J. Gautam, S. Kumar and P.C.Sabumon, Preliminary study of physico-chemical treatment options for hospital wastewater. *Journal of Environmental Management* 83, 298-306, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.009>.
- [13] S. Suarez, J.M. Lema and F. Omil, Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation-flocculation and flotation. *Bioresource Technology*, 100, 2138-2146, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.015>.
- [14] C.I. Kosma, D.A. Lambropoulou and T.A. Albanis, Occurrence and removal of PPCPs in municipal and hospital wastewaters in Greece, *Journal of Hazardous Materials* 179, 804-817, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.075>.
- [15] C. Cruz-Morató, D. Lucas, M. Llorca, S. Rodriguez-Mozaz, M. Gorga, M. Petrovic, D. Barceló, T. Vicent, M. Sarrà and E. Marco-Urrea, Hospital wastewater treatment by fungal bioreactor: Removal efficiency for pharmaceuticals and endocrine disruptor compounds. *Science of the Total Environment* 493, 365-376, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.117>.
- [16] A. Arslan, S. Veli and D. Bingöl, Use of response surface methodology for pretreatment of hospital wastewater by O3/UV and O3/UV/H2O2 processes, *A Separation and purification technology*, 132, 561-567, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.036>.
- [17] A. Altın, M. Değirmenci and S. Altın, Sivas Kentinde Bulunan Hastane Atıksularının Miktar ve Özelliklerinin Belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 1, 2, 33-47, 1999.
- [18] S. Sarı, Konya İli Hastane Atıksularının Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2002.
- [19] P. Gültekin, Hastane Atıksularının Karakterizasyonu, Arıtılabilirliği ve Eskişehir İline Ait Bir Örnek, Yüksek



- Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2005.
- [20] G. Persoone, B. Marsalek, I. Blinova, A. Törökne, D. Zarina, L. Manusadzianas, G. Nalecz-Jawecki, L. Tofan, N. Stepanova, L. Tothova and B. Kolar, A practical and user-friendly toxicity classification system with microbiotests for natural waters and wastewaters. *Environmental Toxicology*, 18(6), 395-402, 2003. <https://doi.org/10.1002/tox.10141>.
- [21] S. Aydın, M.E. Aydın, F. Bedük and A. Ulvi, Toxicity of Hospital Wastewater, VI. Eurasian Conference on Civil and Environmental Engineering (ECOCEE) – Istanbul, Turkey, 17-18 June 2019.
- [22] M. Aydın and G. Kara, An Investigation on The Toxicity of Sewage, *Fresenius Environmental Bulletin*, 13 –12a, 1444 – 1448, 2004.
- [23] B. Czech, I. Joško and P. Oleszczuk, Ecotoxicological evaluation of selected pharmaceuticals to *Vibrio fischeri* and *Daphnia magna* before and after photooxidation process. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 104, 247-253, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.03.024>.
- [24] K. Tang, A. Spiliotopoulou, R.K. Chhetri, G.T.H. Ooi, K.M.S. Kaarsholm, K. Sundmark, B. Florian, C. Kragelund, K. Bester and H.R. Andersen, Removal of pharmaceuticals, toxicity and natural fluorescence through the ozonation of biologically-treated hospital wastewater, with further polishing via a suspended biofilm, *Chemical Engineering Journal* 359, 321-330, 2019. <https://doi.org/10.3390/w12041059>.





## Arazi kullanımının sulak alandan tarıma dönüştürülmesinin bazı toprak özellikleri üzerindeki etkileri ve bunların toprak derinliği ile değişimi

### The effects of land use conversion from marshland to farmland on some soil properties and their changes with soil depth

Selma Yaşar Korkaç<sup>1,\*</sup>, Mustafa Korkaç<sup>2</sup>, Muhammet Hüseyin Mert<sup>3</sup>, Abdurrahman Geçili<sup>4</sup>, Yusuf Serengil<sup>5</sup>

<sup>1,4</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

<sup>2</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

<sup>3</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 51240, Niğde Türkiye

<sup>5</sup> İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Orman Mühendisliği Bölümü 34473, Sarıyer, İstanbul Türkiye

#### Öz

Dünyada sulak alan ekosistemlerini etkileyen en önemli insan müdahalelerinden biri arazi kullanımının değiştirilmesidir. Bu çalışmanın amacı, Sultan Sazlığı örneğinde sulak alandan tarıma dönüştürmenin sulak alan ve civarı topraklarda organik karbon ve bazı toprak özellikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktır. Bu amaçla sulak alan ekosisteminde bulunan sazlık (Örtülüakar ve Kepir Sazlıkları) ve tarıma dönüştürülmüş alanlardan doğal yapısı bozulmamış toprak örnekleme yapılmış (0-40 cm) ve 10 ar cm' lik derinlik kademesine ayrılarak her bir derinlik kademesindeki organik karbon miktarı (TOK) ile hacim ağırlığı belirlenmiş ve karbon depolama kapasiteleri hesaplanmıştır. Ayrıca her bir arazi kullanım şekline göre iki derinlik kademesinden (0-20 cm ve 20-40 cm) alınan toprak örneklerinin toprak tekstürü, pH, elektriksel iletkenlik (EC), ateşte kayıp, agregat stabilitesi özellikleri belirlenmiştir. Tarıma dönüştürme Sultan Sazlığı ekosistemindeki çeşitli toprak özelliklerini etkilemiştir. Arazi kullanımı dönüşümlerinden etkilenen toprak özellikleri; organik karbon, karbon depolama kapasitesi, agregat stabilitesi, kum, kil, toz içeriği, hacim ağırlığı, ateşte kayıptır. Toprak derinliği değişiminden etkilenen toprak özellikleri ise organik karbon, karbon depolama kapasitesi, pH, kil, kum içeriği ve hacim ağırlığıdır.

**Anahtar kelimeler:** Sultan Sazlığı, Toprak organik karbonu, Karbon depolama kapasitesi, Toprak özellikleri, Arazi kullanımı dönüşümü

#### 1 Giriş

İklim değişikliği ve küresel ısınma bütün dünyayı etkileyen olaylar olarak günümüzün en önemli çevresel problemlerindedir. İklim değişikliğinin nedenleri genel olarak iki başlıkta toplanmaktadır: 1. Doğal nedenler: a) Kıtasal sürüklenmeler, b) Volkanik patlamalar, c) Güneş etkinlikleri, d) Dünya yörüngesindeki değişimler. 2. Yapay nedenler: a) Fosil yakıt kullanımına bağlı olarak artan sera gazı konsantrasyonları (kuvvetlenmiş sera etkisi), b)

#### Abstract

One of the most important human interventions affecting wetland ecosystems in the world is land use change. The aim of the study is to reveal the effects of land use conversion (wetland to farmland) on soil organic carbon and some soil properties of wetlands in the case of the Sultan Marshes. Undisturbed soil samples were collected from a depth of 0-40 cm in marshlands (Örtülüakar and Kepir Marshes) and in those converted to farmland in the wetland ecosystem and the amount of soil organic carbon (SOC), bulk density and carbon storage capacity of soils at each land use types were calculated by dividing into 10 cm soil depth levels. In addition, disturbed soil samples were taken at two soil depths (0-20 cm and 20-40 cm). Some physical and chemical properties of soils were analyzed using this samples such as particle size distribution, pH, electrical conductivity (EC), loss on ignition and aggregate stability. Soil organic carbon, carbon storage capacity, loss on ignition, aggregate stability, clay, silt, sand contents and bulk density were the soil properties affected by land use conversion. Soil organic carbon, carbon storage capacity, pH, clay, sand contents and bulk density were the soil properties showed changes with soil depth.

**Keywords:** Sultan Marshes, Soil organic carbon, Carbon storage capacity, Soil properties, Land use conversion

Savaşlar, c) Arazi kullanımındaki değişimler [1]. Küresel ısınmanın etkilerini sınırlamak için sera gazı emisyonlarını kontrol altına almak veya azaltmaya çalışmak önemli mücadele yollarındandır [2]. Küresel ısınma üzerinde CO<sub>2</sub>'in etkisi % 55-80 olarak tahmin edilmektedir [3]. Atmosfere sera gazı katılımlarını kontrol altında tutmaya çalışmak için doğal sistemlerden yararlanmak dikkate alınması gereken yollardan biridir. Dünyadaki en önemli karbon depolama alanları, atmosfer, karasal ekosistemler ve okyanuslardır.

İnsanlar, özellikle bu karbon depolama alanlarına yapmış oldukları çeşitli müdahaleler ile küresel ısınmanın yavaşlatılmasında veya hızlanmasında etkin rol oynamaktadırlar [4]. Sulak alanlar, anoksik ıslak koşullarından dolayı atmosferdeki karbonu saklayan en önemli ve optimum doğal ekosistemlerdendir. Atmosfere sera gazı katılımını kontrol altında tutmaya çalışmak için doğal sistemlerden faydalanmak etkilidir. Bu alanlar arasında sulak alanlar ücretsiz karbon depolama hizmeti sunan etkili karbon havuzları olarak bilinirler [5-8]. Dünyada nüfusun artışı, özellikle gelişmekte olan ülkelerde, açlık başta olmak üzere insan yaşamını etkileyen pek çok sorunu beraberinde getirmektedir. Bu sorunların ortadan kaldırılması için yeni tarım alanları kazanılmaya çalışılmakta, yerleşim ve endüstriyel amaçlı olarak sulak alanlar, ormanlar, meralar vb. doğal ekosistemler tahrip edilmektedir. Günümüzde yeni tarım alanları açma, mevcut sulardan faydalanma, beslenme kaynaklarının kontrol altına alınması gibi nedenlerle sulak alanların Türkiye ve yeryüzündeki alanları giderek daralmaktadır [9]. IPBES'de (Biyçeşitlilik ve Ekosistem Hizmetlerine İlişkin Hükümetlerarası Bilim-Politika Platformu) [10] sulak alanların ormanlara göre 3 kat daha hızlı bozulduğu ve yok olduğu belirtilmektedir. 1900'lü yıllardan beri dünya sulak alanlarının %71'ini kaybetmiş olup, bunun en önemli nedenlerinden biri olarak sulak alanlardaki tarımsal aktiviteler gösterilmektedir [11-14]. Avrupa'da özellikle son 300 yıldır sulak alanlar, özellikle tarımsal uğraşlar nedeniyle yok olma tehdidi altındadır. Örneğin İspanya'da, 20. yüzyıl boyunca sulak alanların % 60-65'i yok olmuştur. Bu tahribatın büyük kısmı ise 1950-1990 döneminde gerçekleşmiştir [15]. Sulak alanların tarıma dönüştürülmesi çeşitli toprak özelliklerini değiştirebilmektedir [16]. Sulak alanlardaki arazi kullanım değişimlerinin toprak organik karbonu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi insan etkilerine organik madde döngüsü açısından sulak alanların tepkisini ortaya koymak açısından son derece önemlidir. Son yıllarda sulak alanlardaki arazi kullanımını değişimleri konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır [17-19].

Türkiye'de de özellikle 1950-1970 yılları arasında, tarım alanı açmak, taşkınları önlemek ve sıtma ile mücadele etmek için çok sayıda sulak alan kurutulmuş veya su rejimine yapılan müdahaleler nedeniyle kurumaya terk edilmiştir [20]. Sultan Sazlığı bu dönüşümlerden etkilenmiş olan ve ülkemizde antropojen süreçlerin sulak alanlar üzerindeki baskısının çok iyi gözlemlendiği en önemli Ramsar alanlarımızdan birisi olduğu için araştırma alanı olarak seçilmiştir. Bu önemli ekosistem 1950'li yıllardan itibaren kurutma çalışmalarına maruz kalmış, besleyen derelerin bazıları üzerine barajlar ve göletler inşa edilmiş ve bazı bölümleri tarıma açılmıştır. Sultan Sazlığı yöresinde önceden yapılmış çalışmalar, daha çok ekolojik, hidrolojik çalışmalardır [21-26]. Ayrıca son yapılan çalışmalar, arazi kullanımını değişimlerinin uzaktan algılama teknikleriyle belirlenmesine yöneliktir [9,27-29]. Doğal sulak alanlarda depolanan karbon tahminleri ve bu stoklar üzerinde arazi kullanım dönüşümlerinin etkileri ile ilgili yersel metotlara dayalı çalışma ve veri eksikliği mevcuttur. Tarıma dönüştürme şeklindeki arazi kullanım değişimlerinin karbon

bütçesi ve toprak özellikleri üzerindeki etkilerini bilmek sürdürülebilir ekosistem ve karbon yönetimi ile ilgili çalışmalara katkı sağlaması yönünden önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, sulak alanı tarıma dönüştürmenin Sultan Sazlığı'ndaki toprakların organik karbon ve bazı toprak özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemektir.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Araştırma alanının tanıtımı

Sultan Sazlığı Kayseri ili sınırları içerisinde, 38° 12' 14''- 38° 25' 49''Kuzey enlemleri ile 35° 09' 20''-35° 22' 20''Doğu boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 1). Mevsimlere göre yüzey alanı 8.000-13.000 ha arasında değişen bir sulak alandır. Denizden yüksekliği 1070-1150 m arasında değişmektedir. Ortalama eğimi % 2'dir [30,24]. Sultan Sazlığı "Yarı-kurak Subtropikal Akdeniz Karasal" iklim özellikleri göstermektedir [25,31]. Yıllık ortalama sıcaklık 11 °C ve yıllık ortalama yağış 363 mm.'dir [32]. Sultan Sazlığı 1994 yılında Ramsar Sözleşmesi'ne göre Uluslararası Öneme Sahip Sulak Alan kategorisine dâhil edilmiştir [33]. Sultan Sazlığı'nın da içinde bulunduğu Develi Kapalı Havzası'ndaki topraklar genellikle alüvyal karakterde olup, yer yer tuzlu ve alkali özellik göstermektedir [34]. Kalın, koyu renkli, organik madde bakımından zengin hidromorfik alüvyal topraklar geçici göl ve sazlıkların bulunduğu alanlardadır [35]. Develi Ovası'nın güneydoğusunda Musahacılı ve Yerköy civarında ise kireçli kahverengi topraklar mevcuttur [25,36]. Sultan Sazlığı'ndaki araziler genellikle yerleşim, tarım, otlatma gibi amaçlar için kullanılmaktadır.

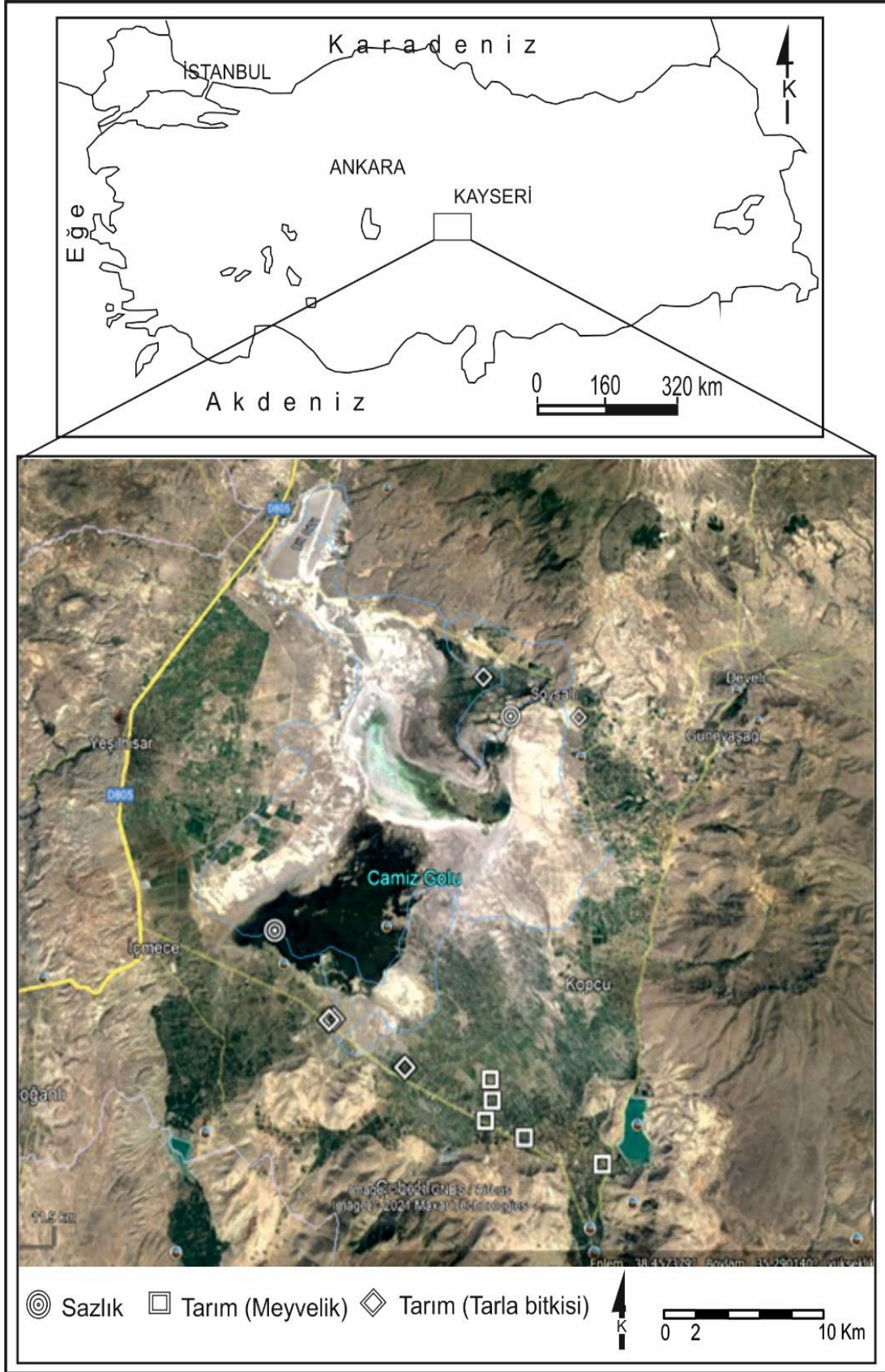
Sultan Sazlığı büyük ölçekli sulama ve drenaj projeleri, aşırı otlatma, sentetik gübre ve tarım ilaçları kullanımı, saz kesimi, tarıma dönüştürme ve yasadışı avlanma gibi çeşitli insan faaliyetleri nedeniyle bozulma tehdidi altındadır [32]. Bu sulak alanda yukarıda söz edilen benzer amaçlarla bazı bölümler kurutularak tarıma açma şeklinde arazi kullanımı değişikliklerine maruz kalmıştır. Sultan Sazlığı ve yakın çevresinde, uzaktan algılama teknikleriyle yapılan çalışmalarda geçmişten günümüze yaklaştıkça çalışma sahası ve yakın çevresinin arazi örtüsü ve arazi kullanımında çeşitli değişimlerin yaşandığı belirtilmiştir [27,29]. Bu çalışmalarda özellikle tarım faaliyetlerinin ciddi derecede arttığı buna karşın doğal bitki örtüsü alanları ve su alanlarının azaldığı vurgulanmıştır.

Güney'deki Örtülüakar Sazlığı, Kuzey'de yer alan Kepir Sazlığı'na göre daha iyi korunmakta olup, Kepir Sazlığı insani müdahalelere daha fazla maruz kalmaktadır.

### 2.2 Arazi çalışmaları

Literatürde yer alan çalışmalara göre, araştırma alanındaki en önemli müdahalenin 1940'lı yıllardan başlayan sulak alanın kurutma çalışmalarına maruz bırakılarak tarıma açılmasıdır. İnsan etkilerini daha iyi ayırt edebilmek için arazi koşullarına göre toprak örnekleme yapılan arazi kullanım şekilleri şunlardır: 1. Örtülüakar (güney) Sazlığı, 2. Kepir (kuzey) Sazlığı, 3. Eskiden sulak





Şekil 1. Örnekleme alanlarının konumu ve yer bulduru haritası



**Tablo 1.** Toprak örnekleme alanlarına ilişkin tanımlayıcı bilgiler

Lokasyon	Arazi kullanım durumu	Enlem	Boylam	Otlama durumu	Vejetasyon ve yönetim uygulamaları
Mustafabeyli	Tarım- (Meyvelik)	38.155921°	35.372572°	Yok	Elma bahçesi, sıra aralarında toprak işleme var, hayvansal ve suni gübreleme var 3x5 m
Karamadazı	Tarım (Meyvelik)	38 18 60 56	35 28 44 80	Yok	Elma bahçesi, sıra aralarında toprak işleme var, hayvansal ve suni gübreleme var 3x5 m
Yuları	Tarım- (Meyvelik)	38.166676°	35.331716°	Yok	Elma bahçesi, sıra aralarında toprak işleme var, hayvansal ve suni gübreleme var 3x5 m
Ovaçifliği	Sazlık	38.255875°	35.191497°	Var	Phragmatis, Bitki boyu ort: 1.5 m bitki yoğunluğu %95
İlyaslı-Musahacılı arası	Tarım- (Meyvelik)	38.190423°	35.314616°	Yok	Elma bahçesi, sıra aralarında toprak işleme var, gübreleme var, 3x5 m
İlyaslı-Yerköy arası	Tarım- (Meyvelik)	38.181732°	35.315157°	Yok	Elma bahçesi, sıra aralarında toprak işleme var, hayvansal ve suni gübreleme var 3x5 m
İlyaslı	Tarım- (Meyvelik)	38.173637°	35.311094°	Yok	Elma bahçesi, sıra aralarında toprak işleme var, hayvansal ve suni gübreleme var 3x5 m
Senirköy-Yeşilova arası	Tarım-ayçiçeği	38.214443°	35.225096°	Yok	Arpa, ayçiçeği, şeker ve süper fosfat gübresi ve hayvan gübresi atılıyor
Senirköy-Ovaçifliği - Yerköy	Tarım Arpa, ayçiçeği	38 22 00 76	35 23 88 74	Yok	Arpa, ayçiçeği, şeker ve süper fosfat gübresi ve hayvan gübresi atılıyor
Senirköy- Musahacılı arası	Tarım-arpa	38.193873°	35.267758°	Yok	Arpa, hayvansal ve suni gübreleme var şeker ve süper fosfat gübresi atılıyor
Senirköy-Yeşilova arası	Tarım-arpa, ayçiçeği	38.214848°	35.227588°	Yok	Arpa, ayçiçeği, hayvansal ve suni gübreleme var (Şeker ve süper fosfat)
Sindelhöyük-Soysallı arası	Tarım-mısır, ayçiçeği	38.363322°	35.380662°	Yok	Mısır, ayçiçeği, şeker ve süper fosfat gübresi, ahır gübresi atılıyor, toprak yüzeyinde 15 cm'lik bir kisti tabaka var.
Sindelhöyük-Kepir arası	Tarım-mısır-ay çiçeği	38.386547°	35.319973°	Yok	Mısır, ayçiçeği, şeker ve süper fosfat gübresi, ahır gübresi atılıyor, toprak yüzeyinde 15 cm'lik bir kisti tabaka var.
Sindelhöyük-Kepir	Sazlık	38.364801°	35.336495°	Var	Phragmatis, Bitki boyu 1.5-2 m bitki yoğunluğu %90-95. Soysallı kaynağından beslenmekte, su yüksekliği 50 cm.

alan olup, drenaj sonrasında tarıma açılmış araziler (bahçe ve tarım alanları). Toprak örnekleme alanları haritada arazi kullanımına göre alansal (bölgesel) olarak işaretlenmiştir (Şekil 1).

Arazi çalışmaları ve toprak örneği derlenmesi, 2018 yılı sonbaharından itibaren 2019 yılı yaz-sonbahar aylarında gerçekleştirilmiştir. Toprak örnekleme parsellerinin alındığı bölgelerinin tanımlayıcı bazı özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Arazi kullanım şekillerinin her birinden en az 3 adet örnekleme parseli belirlenmiş (20x30 m) ve her bir örnekleme parselinden 3 noktadan örnekleme tüpleri yardımıyla doğal yapısı bozulmamış toprak örnekleme yapılmıştır (0-40 cm). Alınan bu örnekler gerekli koruma önlemleri alınarak muhafaza edilmiş ve laboratuvara taşınmıştır. Daha sonra laboratuvarında 10'ar cm'lik kademelere ayrılarak organik karbon, hacim ağırlığı ve karbon depolama kapasitesi her bir derinlik kademesi için ayrı ayrı belirlenmiştir. Doğal yapısı bozulmuş toprak örnekleme toprak el burgusu yardımıyla iki derinlik (0-20 cm; 20-40 cm) kademesinden yapılmıştır.

### 2.3 Laboratuvar çalışmaları

Toprakların organik karbon (TOK), hacim ağırlığı, karbon depolama kapasitesi, pH, elektriksel iletkenlik (EC), agregat stabilitesi, ateşte kayıp, tane boyut dağılımı (tekstür) özellikleri belirlenmiştir. Laboratuvar koşullarında hava

kurusu hale getirilen topraklar, 2 mm'lik elekten geçirilmiştir. pH ve elektriksel iletkenlik Hache-Lange çoklu parametre ölçüm cihazı kullanılarak 1:5 toprak-su karışımında belirlenmiştir. Ateşte kayıp Nelson ve Sommers [37]'a göre; hacim ağırlığı silindir metodu ile belirlenmiştir [38]. Tane boyut dağılımı hidrometre metodu [39] kullanılarak hesaplanmıştır Toprak organik karbonu Walkley ve Black [40]'e göre belirlenmiştir. Agregat stabilitesi Kemper ve Rosenau [41]'a göre belirlenmiştir. Toprakların karbon depolama kapasitesi(TOKs) ise aşağıdaki Denklem (1) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır [42].

$$\text{TOKs} = \text{TOK} \times \text{Toprak derinliği} \times \text{Hacim ağırlığı} \times 10.000 \quad (1)$$

### 2.4 Araştırma deseni ve istatistiksel analizler

Örnekleme deseni tamamen tesadüfî örnekleme parselleri olup, toprak derinliği ((0-10 cm (1.derinlik kademesi), 10-20 cm (2. Derinlik kademesi), 20-30 cm (3. Derinlik kademesi), 30-40 cm (4. Derinlik kademesi)) (toprak organik karbonu, hacim ağırlığı ve karbon depolama kapasitesi için) ve 0-20 cm (1. Derinlik kademesi (üst toprak)), 20-40 cm (2. Derinlik kademesi (alt toprak)) (diğer toprak özellikleri için) ve arazi kullanımı (tarım alanı, Örtülüakar Sazlığı, Kepir Sazlığı) şeklindedir. İstatistiksel değerlendirmelerde IBM SPSS 24.00 istatistik paket

programı kullanılmıştır. Toprak derinliği ve arazi kullanımının toprak özelliklerini etkileyip etkilemediğini belirlemek için varyans analizi yapılmış, farklı ortalamalar Duncan testi ile belirlenmiştir ( $\alpha=0.05$ ) [43].

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Toprak özelliklerinin arazi kullanımına göre değişimi

Arazi kullanımı, toprak derinliği faktörleri ve etkileşimlerine ilişkin varyans analizi sonuçları **Tablo 2**'de gösterilmiştir; değerlendirmeler ana etkilere göre yapılmıştır. Araştırma alanı topraklarının ortalama organik karbon içeriği arazi kullanımını değişiminden istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilenmiştir ( $P<0.05$ ) (**Tablo 2**). Tarım alanı (% 1.47) ve Kepir Sazlığı topraklarının organik karbon içeriği (%1.44) birbiriyle istatistiksel olarak benzer iken, Örtülüakar Sazlığı'nın organik karbon içeriği (%2.95) bunlardan yüksek ve farklıdır (**Şekil 2**). Yang vd. [44] üst topraklardaki toplam organik karbon değerlerinin arazi kullanımındaki değişimlerden etkilendiğini rapor etmişlerdir. Santin vd. [45] ise büyüme sürecindeki bitkilerin toprağın çevresini değiştirerek organik karbonunu etkileyebileceğini ifade etmişlerdir. Bu bağlamda Örtülüakar Sazlığı'ndaki organik karbon içeriğinin yüksek olması, bu bölgede koruma faaliyetlerinin daha etkin olması, dolayısıyla insan etkilerine daha az maruz kalması ile sazlık alandaki yüksek organik karbon miktarı ise bu alandaki bitkilerden sürekli organik materyal girişi ile açıklanabilir. Tarım alanlarında sazlık alanlara göre organik karbon miktarı daha azdır. Toprak işleme faaliyetleri organik maddenin ayrışma hızını artırmakta ve toprakların organik madde miktarında azalmaya sebep olabilmektedir [17,46]. Tarım alanında Kepir Sazlığı'na yakın organik karbon bulunmasının sebebi ise hayvan gübresi kullanımı olabilir.

Arazi kullanımı değiştiğinde toprakların karbon depolama kapasiteleri de istatistiksel olarak önemli düzeyde değişmiştir (**Tablo 2**). Örtülüakar Sazlığı'ndaki toprakların ortalama karbon depolama kapasitesi (31.38 ton/ha) tarım alanları (15.35 ton/ha) ve Kepir Sazlığı'ndaki topraklarda ölçülen karbon depolama kapasitelerinden (12.87 ton/ha) yüksek ve istatistiksel olarak farklıdır. Tarım alanı ve Kepir Sazlığı'ndaki toprakların karbon depolama kapasiteleri istatistiksel olarak benzerlik göstermiştir (**Şekil 2**).

Genel bir değerlendirme yapıldığında en yüksek karbon depolama kapasitesi Örtülüakar Sazlığı'ndaki topraklarda bulunmuştur. Tarım alanı ve Kepir Sazlığı'ndaki topraklarda ise nispeten daha düşük karbon depolama kapasitesi saptanmıştır. Tarım alanındaki organik karbon depolamasına ise tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan hayvan gübresi kullanımının da katkı sağladığı düşünülmektedir. Sazlık alan topraklarındaki karbon depolama kapasitesinin daha yüksek olması yukarıda da belirtildiği gibi vejetasyon tarafından devamlı sağlanan organik madde katkısı ve anaerobik koşullar nedeniyle organik maddenin ayrışma hızının yavaş olmasıyla açıklanabilir. Kepir Sazlığı'nda tarım alanına göre düşük çıkmasının bu bölgenin insani müdahalelere daha açık olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bu sonuçlar bize tarımsal faaliyetler gibi sürekli vejetasyona sahip olmayan insani faaliyetlerin toprakların organik karbon ve karbon depolama kapasitelerini etkilediğini

göstermiştir. Bu çalışma bulguları küresel karbon döngüsü açısından önemli bir yutak olan sazlık alanların insan etkilerine karşı korunmasının önemini ortaya koymuştur.

Toprakların ortalama hacim ağırlığı değerleri arazi kullanımındaki değişimden istatistiksel açıdan önemli düzeyde etkilenmiştir ( $P<0.05$ ) (**Tablo 2**). Kepir Sazlığı'ndan alınan toprakların ortalama hacim ağırlığı değerleri ( $0.95 \text{ g/cm}^3$ ), Örtülüakar Sazlığı ( $1.20 \text{ g/cm}^3$ ) ve tarım alanlarında ( $1.30 \text{ g/cm}^3$ ) belirlenen değerlerden istatistiksel farklılık göstermiştir. Tarım ve Örtülüakar Sazlığı'ndan alınan toprakların ortalama hacim ağırlığı değerleri istatistiksel açıdan benzerdir (**Şekil 3**). Sazlık alanlardaki hacim ağırlığının düşük çıkmasının nedeninin, bu alanlardaki sürekli organik materyal girişinin ve dolayısıyla organik madde miktarının tarım alanına göre yüksek olması ve tarım alanlarındaki toprak işlemeden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Tufa vd. [47] da üst topraklarda tarım topraklarının hacim ağırlığı, mera ve orman alanlarındaki hacim ağırlığından yüksek bulunmuştur. Örtülüakar Sazlığı'nda Kepir Sazlığı'na göre hacim ağırlığının yüksek çıkmasının nedeninin toprak tanelerinin tekstürel ve minerolojik bileşimindeki farklılıktan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Araştırma alanı topraklarının pH değerleri arazi kullanımındaki değişimlerden istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilenmemiştir ( $P>0.05$ ) (**Tablo 2**) (**Şekil 4**). Tarım topraklarının pH değerlerinin (8.35) sazlık alanlarda belirlenen pH değerlerinden (Örtülüakar S. (8.28); Kepir S.(8.22) daha yüksektir (**Şekil 4**). Sazlık alanda nispeten düşük pH'ın, organik karbon içeriğinin yüksek olmasından ve vejetatif materyalin dekompozisyonu sonucu ortamda oluşan hümik asitlerden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir [48]. Zhu vd. [16] ise doğal, drene edilmiş, soya fasulyesi tarım alanına ve sonradan pirinç ekim alanına dönüştürülmüş arazi kullanımları arasında 0-20 cm pH'ın değiştiğini ancak çok yüksek bir değişimin söz konusu olmadığını rapor etmişlerdir.

EC değerleri arazi kullanımını değişiminden istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilenmemiştir ( $P>0.05$ ) (**Tablo 2**). Toprakların ortalama EC değerleri Kepir Sazlığı'nda ( $974 \mu\text{S/cm}$ ), Örtülüakar Sazlığı'nda ( $1097 \mu\text{S/cm}$ ) iken en düşük tarım alanlarında ( $863 \mu\text{S/cm}$ ) bulunmuştur (**Şekil 4**).

Tarım topraklarında sulu tarım uygulamalarının üst topraklarda yıkanma ile toprak tuzluluğunu azaltmış olabileceği düşünülmektedir.

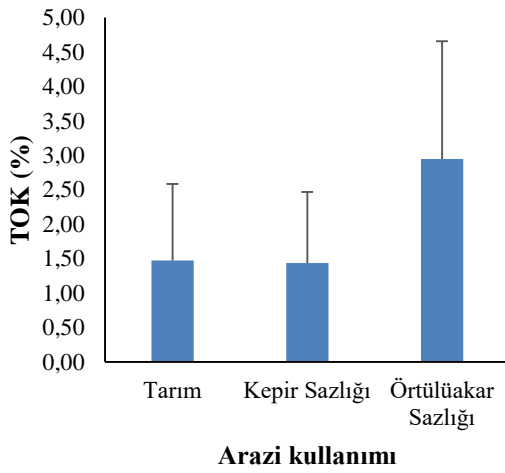
Toprakların ateşte kayıp özelliği arazi kullanımı değişimlerinden istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilenmiştir ( $P<0.05$ ) (**Tablo 2**). Örtülüakar Sazlığı'ndan alınan toprakların ortalama ateşte kayıp değerleri (%16.68), diğer arazi kullanım şekillerinden alınan toprakların ateşte kayıp değerlerinden daha yüksek ve istatistiksel olarak farklıdır (**Şekil 5**).

Toprakların agregat stabilitesi özelliği arazi kullanımı değişimlerinden istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilenmiştir ( $P<0.05$ ) (**Tablo 2**).

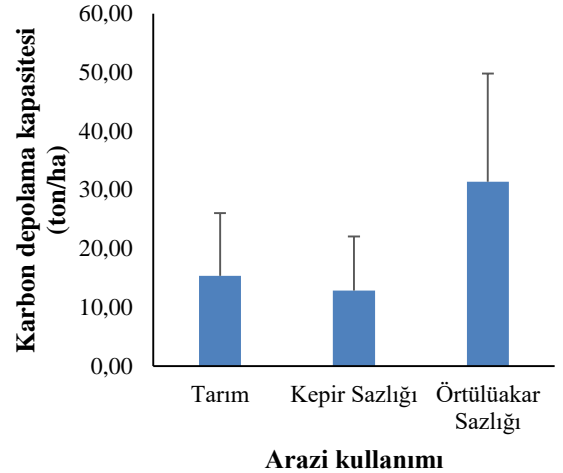
**Tablo 2.** Toprak özelliklerinin arazi kullanımı, toprak derinliği ile bu faktörlerin etkileşimlerine göre değişimi

Varyasyon kaynağı		TOK	TOKs	HA	pH	EC	AS	AK	Kil	Toz	Kum
Arazi kullanımı	P	0.000	0.000	0.003	0.064	0.813	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000
	F	8.473	10.283	6.093	2.813	0.208	10.803	12.935	6.607	7.334	10.448
Toprak derinliği	P	0.005	0.000	0.020	0.000	0.868	0.265	0.560	0.003	0.952	0.000
	F	4.547	7.400	3.397	25.899	0.028	1.252	0.341	9.464	0.004	19.278
Arazi kullanımı x toprak derinliği	P	0.697	0.257	0.989	0.040	0.005	0.103	0.593	0.259	0.751	0.025
	F	0.641	1.311	0.147	3.295	5.554	2.312	0.526	1.366	0.287	3.784

\*TOK: Toprak organik karbonu, TOKs: Karbon depolama kapasitesi, HA: Hacim ağırlığı, EC: Elektriksel iletkenlik, AS: Agregat stabilitesi AK: Ateşte kayıp, P: Önem düzeyi(P<0,05), F: Verilerdeki sistematik varyans miktarını sistematik olmayan varyansla karşılaştıran değer

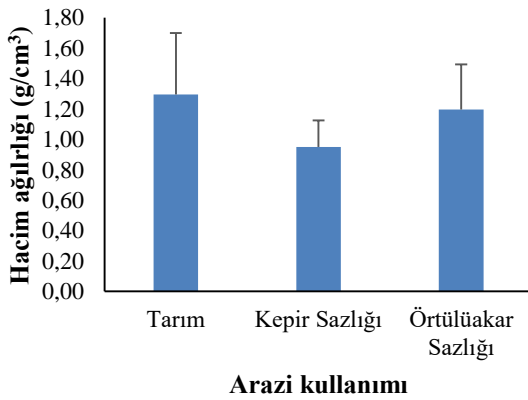


(a)



(b)

**Şekil 2.** Toprakların (a) organik karbonunun ve (b) karbon depolama kapasitesinin arazi kullanımına göre değişimi

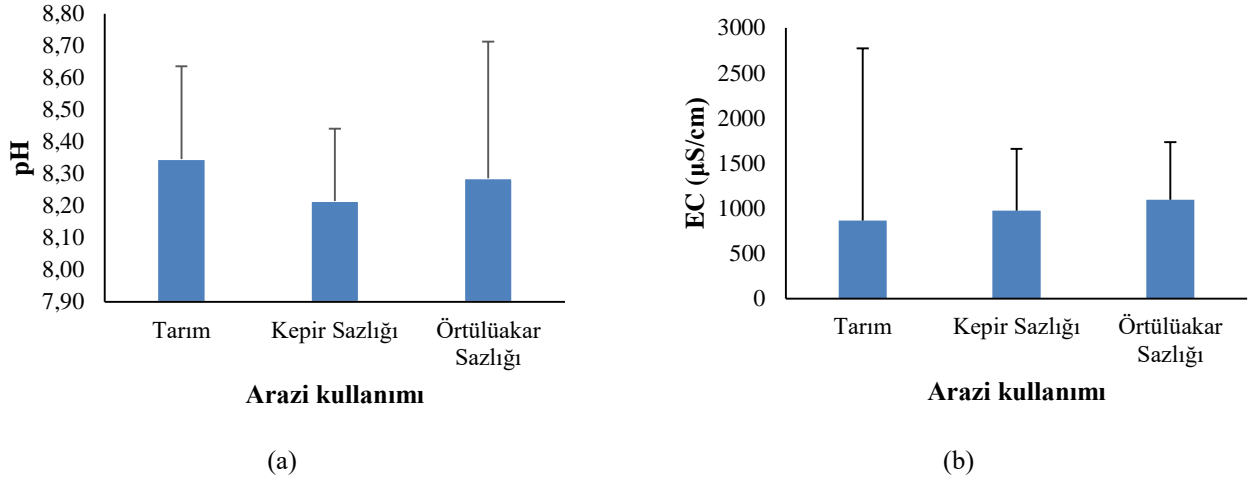


**Şekil 3.** Toprakların hacim ağırlığının arazi kullanımına göre değişimi

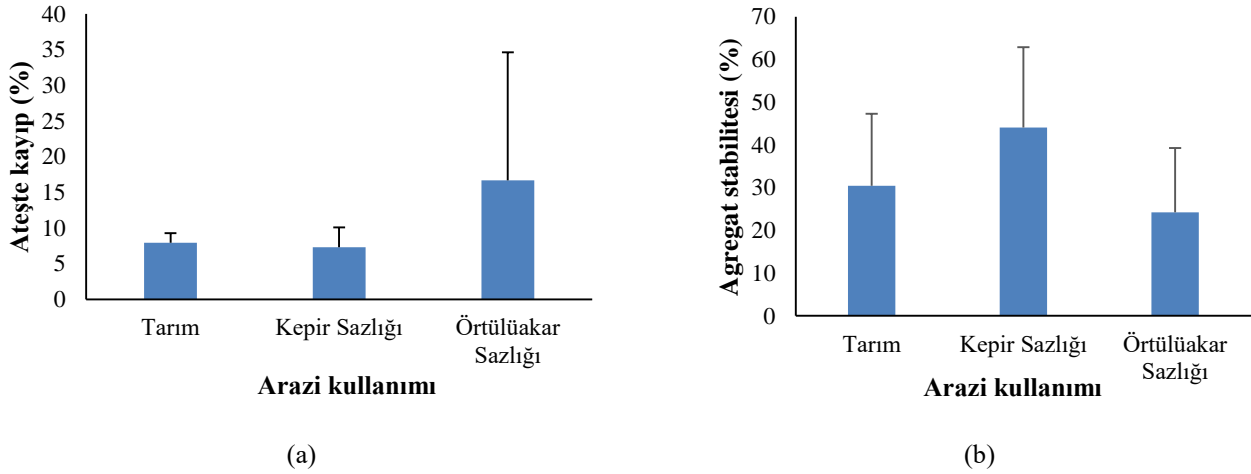
Kepir Sazlığı'ndan alınan toprakların ortalama agregat stabilitesi değerleri (%44.07), diğer arazi kullanım şekillerinden alınan toprakların agregat stabilitesi

değerlerinden yüksek ve istatistiksel olarak farklıdır. Tarım (%30.45) ve Örtülüakar Sazlığı'ndan (%24.18) alınan toprakların ortalama agregat stabilitesi benzerdir (Şekil 5). Nitekim Mainuri ve Owino [49] toprak işlemenin agregat stabilitesi değerlerini azalttığını kaydetmişlerdir. Mainuri ve Owino [49] agregat stabilitesi ile toprak organik karbonu arasında pozitif ilişki olduğunu bulmuşlardır. Nitekim kil ve organik karbon içeriği fazla olan sazlık alanda bu değerlerin yüksek çıkması da bunu doğrulamaktadır. Örtülüakar Sazlığı'ndaki düşüklüğün nedeni ise kum içeriğinin Kepir Sazlığı'na göre yüksek olması ile açıklanabilir.

Uluslararası Toprak Cemiyeti üçgenine göre [50] yapılan değerlendirmeye göre; araştırma alanı toprakları tarım ve sazlık alanlarında balçıklı kil tekstüründedir. Toprakların kil içeriği arazi kullanımındaki değişimden istatistiksel olarak önemli düzeyde etkilenmiştir (P<0.05) (Tablo 2). Kil içeriği bakımından tarım (%39.91) ve Kepir Sazlık (%46.06) alanlarından alınan topraklar benzer; ancak Örtülüakar Sazlığı'ndan (%28.33) alınan topraklar farklıdır (Şekil 6). Araştırma alanı topraklarının toz içeriği arazi kullanımı değiştikçe istatistiksel açıdan önemli değişim göstermiştir (P<0.05) (Tablo 2).

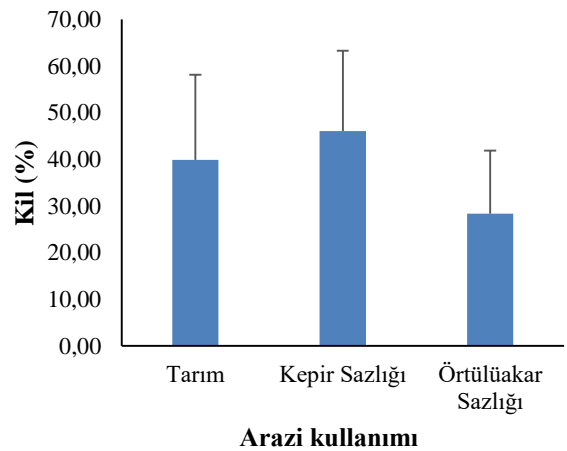


Şekil 4. Toprakların (a) pH ve (b) elektriksel iletkenliğinin arazi kullanımına göre değişimi

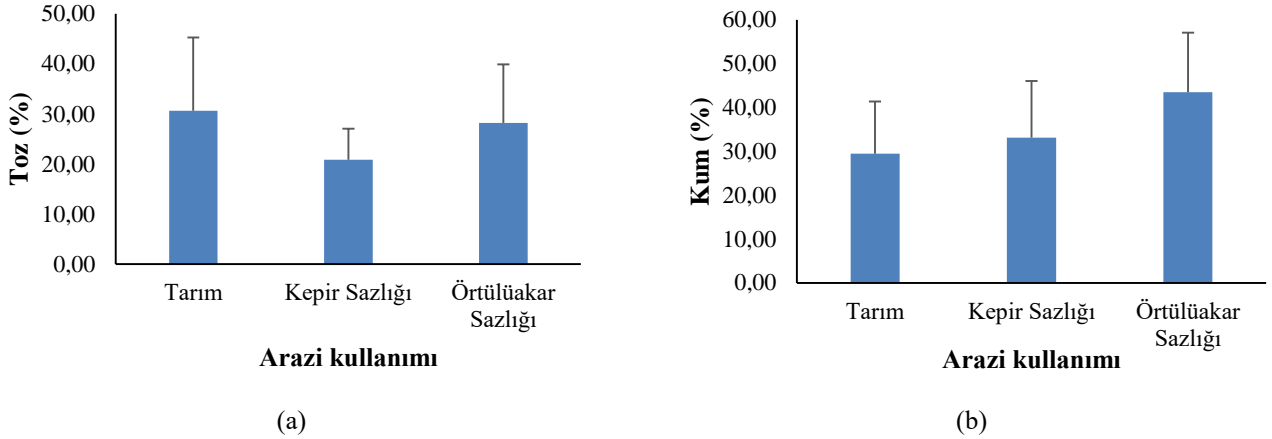


Şekil 5. Toprakların (a) ateşte kayıp ve (b) agregat stabilitesinin arazi kullanımına göre değişimi

Tarım (%30.61) ve Örtülüakar Sazlığı'ndaki (%28.17) topraklarda saptanan toz içerikleri istatistiksel olarak benzer; Kepir Sazlığı'ndaki toz içeriği (%20.85) ise istatistiksel olarak farklı ve diğerlerinden düşüktür (Şekil 7). Toprakların ortalama kum içeriği arazi kullanımını-toprak derinliği etkileşimine göre istatistiksel farklılık göstermiştir ( $P<0.05$ ) (Tablo 2). Kepir Sazlığı (%33.09) ile tarım alanından (%29.48) alınan toprakların kum içerikleri istatistiksel bakımdan benzer, Örtülüakar Sazlığı'nın kum içeriği (%43.50) ise bunlardan yüksek ve istatistiksel açıdan farklı bulunmuştur (Şekil 7). Abbasi vd. [51]'de farklı arazi kullanım şekillerindeki toprakların tekstürleri arasındaki farklılıkların, arazi kullanım şekillerinin farklı yararlanma ve yönetim sistemlerinin toprak özellikleri üzerindeki etkilerini gösterdiğini vurgulamışlardır.



Şekil 6. Toprakların kil içeriğinin arazi kullanımına göre değişimi



Şekil 7. Toprakların (a) toz ve (b) kum içeriğinin arazi kullanımına göre değişimi

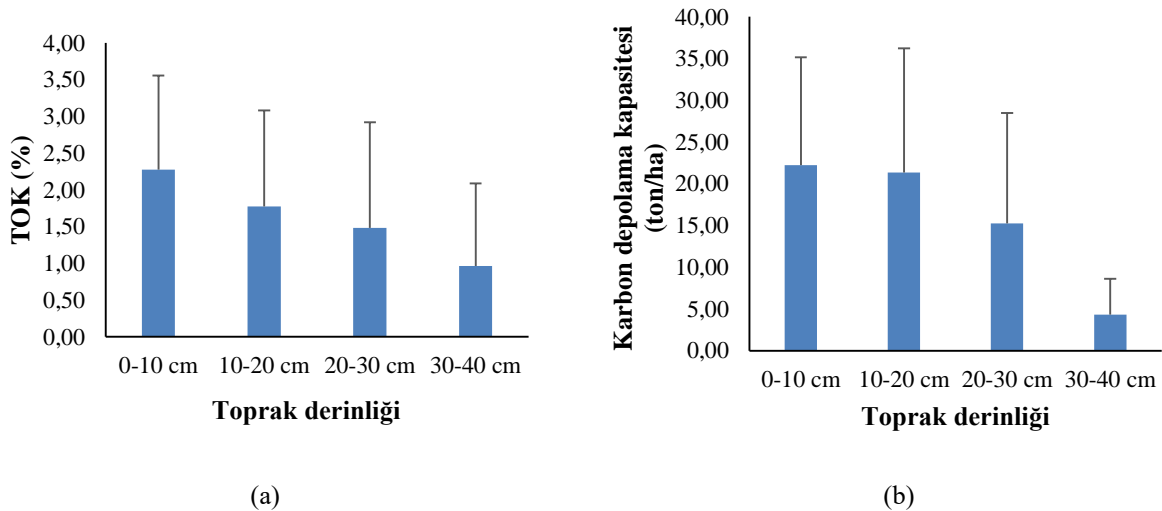
### 3.2 Toprak özelliklerinin toprak derinliğine göre değişimi

Toprak derinliği faktörüne göre istatistiksel analiz sonuçları, ortalama organik karbon içeriğinin toprak derinliğindeki değişimden etkilendiğini göstermiştir ( $P < 0.05$ ) (Tablo 2). Toprak derinliği arttıkça toprakların organik karbon içeriği azalmıştır. 1. ve 2. derinlik kademesindeki organik karbon içerikleri (sırasıyla %2.27; %1.76) istatistiksel olarak birbiriyle benzer, diğer arazi derinlik kademelerinden hem yüksek hem de farklı bulunmuştur. 2. ile 3. ve 3. ile 4. derinlik kademelerindeki toprakların organik karbon içerikleri istatistiksel olarak benzerdir (Şekil 8).

İstatistiksel analiz sonuçlarına göre toprakların karbon depolama kapasitesi de toprak derinliğine göre istatistiksel açıdan önemli düzeyde değişmiştir (Tablo 2). Genel olarak toprak derinliği arttıkça toprakların karbon depolama kapasitesi azalmıştır. Ortalama karbon depolama kapasitesi en yüksek 1. ve 2. derinlik kademesindeki topraklarda (sırasıyla 22.24 ton/ha, 21.32 ton/ha) en düşük ise 4. derinlik kademesindeki topraklarda (4.34 ton/ha) bulunmuştur (Şekil

8). 1. ve 2. derinlik kademelerindeki karbon depolama kapasiteleri birbiriyle benzer, diğer derinlik kademelerinden yüksek ve istatistiksel olarak farklı bulunmuştur. Yine 2. ve 3. derinlik kademelerindeki karbon depolama kapasitesi istatistiksel olarak benzerdir. 4. derinlik kademelerinin karbon depolama kapasitesi değerleri de diğer derinlik kademelerinden düşük ve istatistiksel olarak farklıdır (Şekil 8). Çalışma alanındaki bitki köklerinin dağılımı toprak derinliği arttıkça azalmaktadır. Bu dağılım üst topraklardaki organik madde miktarının fazlalığını açıklamaktadır [52]. Sazlık alanda toprak üstü ve toprak altı biyomas daha fazla olup, tarım alanlarındaki bitki örtüsünün kök derinliği saz bitkilerine göre daha sığdır.

Bu çalışmada, 40 cm'lik toprak sütununda depolanan toplam karbon stoğu Örtülüakar Sazlığı'nda 103,83 ton/ha; Kepir Sazlığı'nda 45.58 ton/ha ve tarım alanlarında 53,86 ton/ha olarak hesaplanmıştır. IPCC (2019) raporunda sıcak ılıman kuru iklim zonlarında varsayılan karbon stok değerleri 30 cm toprak derinliği için yüksek aktiviteli kil topraklarında 24 ton/ha; sulak alan topraklarında 74 ton/ha olarak bildirilmiştir [53].



Şekil 8. Toprakların (a) organik karbonunun ve (b) karbon depolama kapasitesinin toprak derinliğine göre değişimi



Araştırma alanı topraklarının hacim ağırlığı değerleri toprak derinliğindeki değişimden istatistiksel açıdan önemli düzeyde etkilenmiştir (Tablo 2). Üst toprakların hacim ağırlığı alt topraklardan daha düşük ve istatistiksel olarak farklıdır (Şekil 9). Bu durum üst topraklardaki organik materyal fazlalığı ile açıklanabilir.

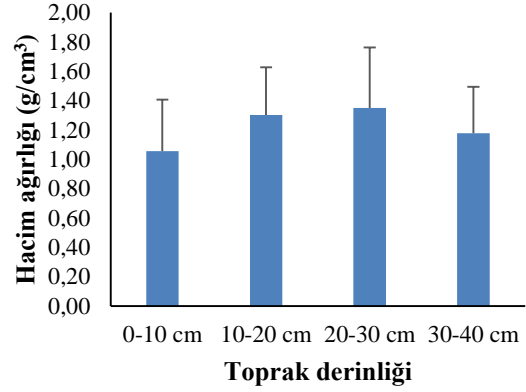
Toprak derinliğine göre üst toprakların pH'ı alt topraklardan daha düşük ve istatistiksel olarak farklı bulunmuştur. Üst toprakların ortalama pH değeri 8.19; alt toprakları ise 8.40 olup, toprak derinliğine göre pH istatistiksel bakımdan önemli düzeyde değişmiştir (Şekil 10, Tablo 2).

Alt ve üst toprakların ortalama EC değerleri istatistiksel farklılık göstermemiştir. Tarım alanları ile Örtülüakar Sazlığı'ndaki toprak derinliği arttıkça EC azalırken, Kepir Sazlığı'nda tersine bir durum söz konusudur (Tablo 2) (Şekil 10).

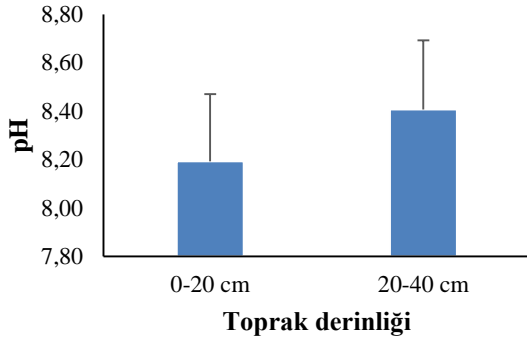
Ateşte kayıp özelliği toprak derinliğindeki değişimden istatistiksel olarak etkilenmemiştir. Toprak derinliğine göre üst toprakların ortalama agregat stabilitesi değerleri (% 32.07) alt topraklarından (% 34.82) daha yüksektir. Ancak bu farklılık istatistiksel olarak önemli değildir (Tablo 2) (Şekil 11).

Üst toprakların kil içeriği (% 35.94); alt toprakların kil içeriğinden (% 44.08) düşük ve istatistiksel olarak farklı

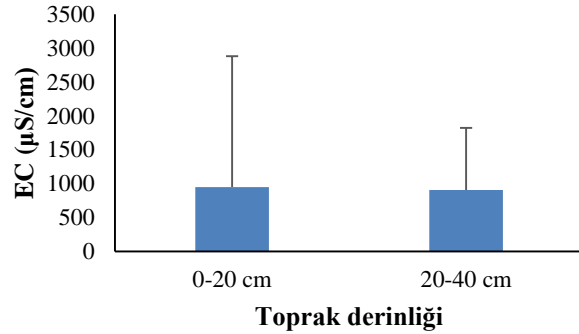
bulunmuştur ( $P < 0.05$ ) (Tablo 2, Şekil 12). Toz içerikleri üst (% 27.91) ve alt (% 27.04) topraklarda istatistiksel farklılık göstermemiştir ( $P > 0.05$ ) (Tablo 2). Kum içeriği, üst topraklarda (% 36.15) alt topraklara (% 28.87) göre daha yüksek ve istatistiksel olarak farklı bulunmuştur (Tablo 2, Şekil 13).



Şekil 9. Toprakların hacim ağırlığının toprak derinliğine göre değişimi

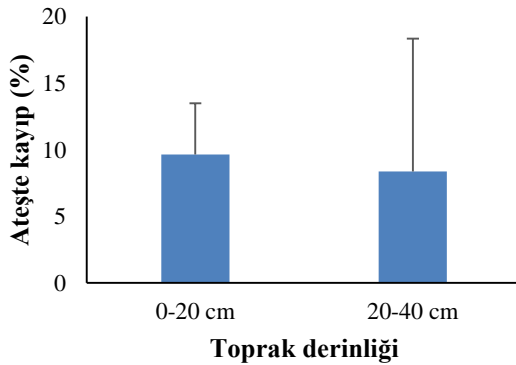


(a)

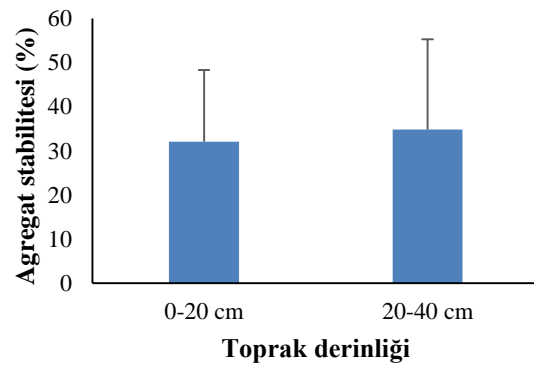


(b)

Şekil 10. Toprakların (a) pH ve (b) elektriksel iletkenliğinin toprak derinliğine göre değişimi

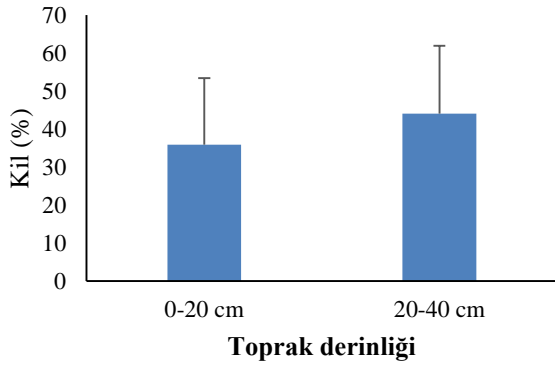


(a)

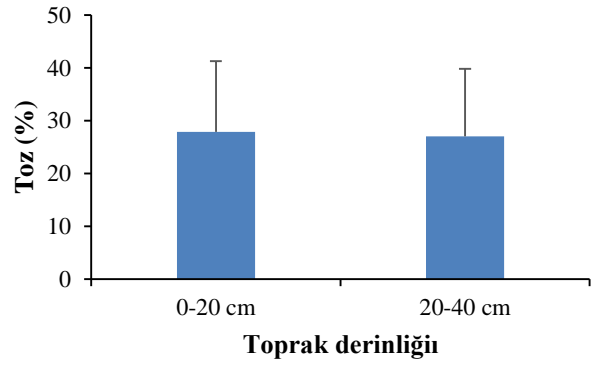


(b)

Şekil 11. Toprakların (a) ateşte kayıp ve (b) agregat stabilitesinin toprak derinliğine göre değişimi

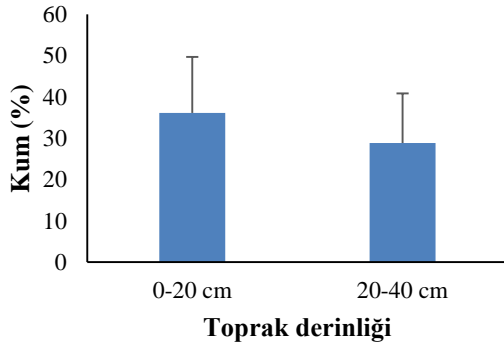


(a)



(b)

Şekil 12. Toprakların (a) kil ve (b) toz içeriğinin toprak derinliğine göre değişimi



Şekil 13. Toprakların kum içeriğinin toprak derinliğine göre değişimi

#### 4 Sonuçlar ve öneriler

Sultan Sazlığı ve civarında arazi kullanımlarındaki ve toprak derinliğindeki değişimler çeşitli toprak özelliklerini önemli düzeyde etkilemiştir. Arazi kullanımı değişimlerinden etkilenen toprak özellikleri; organik karbon, karbon depolama kapasitesi, ateşte kayıp, agregat stabilitesi, kum, kil, silt içeriği ve hacim ağırlığıdır. Toprak derinliği değişiminden etkilenen toprak özellikleri ise organik karbon, karbon depolama kapasitesi, pH kil, kum içeriği ve hacim ağırlığıdır. Organik karbon ve karbon depolama kapasitesi en yüksek Örtülüakar Sazlığı'nda, en düşük ise Kepir Sazlığı'nda bulunmuştur. Toprak derinliği arttıkça organik karbon ve karbon depolama kapasitesi azalmıştır. 40 cm'lik toprak sütununda en yüksek karbon depolama kapasitesi de yine Örtülüakar Sazlığı'ndadır. Her üç arazi kullanım şeklinden alınan topraklar alkalin karakterli olup, en yüksek pH değerleri tarım alanlarındaki topraklardadır. Karbon depolama açısından araştırma alanındaki her üç arazi kullanım şeklindeki topraklar da bir yutak görevi yapmaktadır. Ancak, en iyi karbon yutağı Örtülüakar Sazlığı durumundadır. Bu da bize sürdürülebilir karbon yönetimi bakımından vejetasyonun korunması ve iyileştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Özellikle Kepir Sazlıkları'ndaki yoğun kullanım baskısı kontrol altına alınmalıdır. Nitekim araştırma sonuçları daha iyi korunan Güney Sazlıkları'ndaki karbon depolama kapasitesinin insan etkilerinin daha yoğun görüldüğü Kepir Sazlıkları'na göre daha yüksek olduğunu

ortaya koymuştur. Sazlık alanlar korunması ve iyileştirilmesi gereken en önemli karbon depolama alanlarından biridir. Özellikle tarımsal faaliyetler toprakların karbon depolama kapasitelerini olumsuz yönde etkilemiştir. Sulak alanda toprak karbon yönetimi açısından yeni tarım alanına dönüştürmenin yapılmaması önerilir. Eldeki mevcut tarım alanları da toprağın organik madde miktarını koruyucu ve iyileştirici iyi tarım uygulamalarıyla devam ettirilebilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından finansal olarak desteklenmiştir. Proje No: 118Y277.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

**Benzerlik Oranı:** %16.

#### Kaynaklar

- [1] N. Karakuş, Yutak alanların iklim değişikliği üzerine etkilerinin Türkiye örneğinde araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ç.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.
- [2] <https://www.saltmarshapp.com/science/#science> (Accessed 23 October 2021).
- [3] D. Tolunay ve A. Çömez, Orman topraklarında karbon depolanması ve Türkiye'deki durum, Küresel İklim Değişimi ve Su Sorunlarının Çözümünde Ormanlar, 13-14 Aralık 2007, İstanbul. 2007.
- [4] N. Mısır, M. Mısır ve C. Ülker, Karbon depolama kapasitesinin belirlenmesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, Özel Sayı, 300-305. 2012.
- [5] IPCC, Special report on carbon dioxide capture and storage: Summary for policymakers. Approved by the 8th Session of IPCC Working Group III. IPCC, Montreal, Canada., 2005.
- [6] A. Bedard-Haughn, F. Yongbloed, J. Akkerman, A. Uijl, E. de Jong, T. Yates and D. Pennock, The effects of erosional and management history on soil organic carbon stores in ephemeral wetlands of hummocky agricultural landscapes. Geoderma 135, 296-306. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.004>.

- [7] J. Stern, Y. Wang, B. Gu and J. Newman, Distribution and turnover of carbon in natural and constructed wetlands in the Florida Everglades. *Applied Geochemistry*, 22, 1936–1948. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.04.007>.
- [8] R. Lal, Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*, 363, 815–830, 2008. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>.
- [9] M.E. Sönmez ve M. Somuncu, Sultansazlığı'nın alansal değişiminin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi. *Türk Coğrafya Dergisi* 66, 1-10. 2016.
- [10] IPBES., The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services Report. 2019.
- [11] O.E. Sala, F.S. Chapin, J.J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L.F. Huenneke, R.B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D.M. Lodge, H.A. Mooney, M. Oesterheld, N.L. Poff, M.T. Sykes, B.H. Walker, M. Walker and D.H. Wall, Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287 (5459), 1770–1774. 2000.
- [12] S. Beuel, M. Alvarez, E. Amler, K. Behn, D. Kotze, C. Kreye, C. Leemhuis, K. Wagner, D.K. Willy, S. Ziegler, M and Becker, A rapid assessment of anthropogenic distributions in east African wetlands. *Ecological Indicators*, 684–692. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.034>.
- [13] M. Everard, *Agricultural Management and Wetlands: An Overview. The Wetland Book: I: Structure and Function, Management and Methods*, 1-12. 2016.
- [14] D. Mao, L. Luo, Z. Wang, M.C. Wilson, Y. Zeng, B. Wu and J. Wu, Conversions between natural wetlands and farmland in China: a multiscale geospatial analysis. *Science of The Total Environment*, 634, 550–560. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.009>.
- [15] S. Sanchez-Carrillo, D.G. Angeler, S. Cirujano and M. Alvarez-Cobelas, The Wetland, Its Catchment Settings and Socioeconomic Relevance : An Overview, In: S. Sánchez-Carrillo, and D. Angeler (eds) *Ecology of Threatened Semi-Arid Wetlands. Wetlands: Ecology, Conservation and Management*, vol 2. Springer, Dordrecht 3-23. 2010.
- [16] X. Zhu, Y. Yuan, M. Jiang, C. Song, Y. Li, G. Wang and M.L. Otte, Multi-element fingerprinting of soils can reveal conversion of wetlands to croplands, *Science of The Total Environment*, 752, 141997. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141997>.
- [17] X. Liu, Y. Zhang, G. Dong and M. Jiang, Difference in carbon budget from marshlands to transformed paddy fields in the Sanjiang Plain. *Northeast China. Ecological Engineering* 137, 60–64. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.03.013>.
- [18] T. Zhang, A.X. Mei and Y.L. Cai, Application of spot remote sensing image in landscape classification of Chongming Dongtan. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2, 45–47. 2004.
- [19] J. M. Bian and N. F. Lin, Application of the 3S technology on the landscape evolution in the wetland of lower reach of Huolin River Basin, *Journal of Jilin University*, 35, 221–225, 2005.
- [20] O. Erdem, Sulak Alanlar, Önemi, Temel Sorunları, Türkiye'nin Uluslararası Öneme Sahip Sulak Alanları, *Haber Ekspres Gazetesi*, 28 Şubat 2004.
- [21] F. Dadaşer-Çelik, H.G. Stefan and P.L. Brezonik, Dynamic hydrologic model of the Örtülüakar Marsh in Turkey. *Wetlands* 26, 1089–1102. 2006. [https://doi.org/10.1672/02775212\(2006\)26\[1089:DH MOTR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/02775212(2006)26[1089:DH MOTR]2.0.CO;2).
- [22] F. Dadaşer-Çelik, P.L. Brezonik, and H.G. Stefan, Hydrologic sustainability of the Sultan Marshes in Turkey. *Water International*, 32 (5), 856–876. 2007. <https://doi.org/10.1080/02508060.2007.9672003>.
- [23] F. Dadaşer-Çelik, P.L. Brezonik, and H.G. Stefan, Agricultural and environmental changes after irrigation management transfer in the Develi Basin, Turkey *Irrigation and Drainage Systems*, 22, 47–66. 2008. <https://doi.org/10.1007/s10795-007-9032-4>.
- [24] İ. Gürer, Kayseri Sultansazlığı Tabiatı Koruma Alanının Su Kullanım ve Yönetim Planlaması Araştırması. Son Rapor, Çevre ve Orman Bakanlığı, 32-54. 2004.
- [25] N. Karadeniz, Sultansazlığı örneğinde ıslak alanların çevre koruma açısından önemi üzerinde bir araştırma. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1995.
- [26] N. Karadeniz, Sultan Marshes, Turkey: A new approach to sustainable wetland management. In: Nelson J.G., Serafin R. (eds) *National Parks and Protected Areas. NATO ASI Series (Series G: Ecological Sciences)*, vol 40. Springer, Berlin, Heidelberg. 1997.
- [27] F. Dadaşer-Çelik, M.E. Bauer, P.L. Brezonik and H.G. Stefan, Changes in the Sultan marshes ecosystem (Turkey) in satellite images 1980–2003, *Wetlands* 28 (3), 852–865. 2008. <https://doi.org/10.1672/07-182.1>.
- [28] M.H. Kesikoğlu, U.H. Atasever, A. Kesikoğlu, A.E. Karkınlı, C. Ozkan ve E. Beşdok, Sultan Sazlığı Milli Parkı Ramsar bölgesi arazi örtüsünün belirlenmesi Boosting sınıflandırma yaklaşımı, TUFUAB VIII. Teknik Sempozyumu, 21-23 Mayıs 2015 Konya, Türkiye, 2015.
- [29] N. Jouma and F. Dadaşer-Çelik, Spatiotemporal changes at the Sultan Marshes ecosystem (Turkey) from 1987 to 2013, *EcoLji* 2017, Kayseri, Türkiye, 11-13 May 2017.
- [30] DSİ. Kayseri Develi-Yeşilhisar Ovası Revize Hidrojeolojik Etüd Raporu. DSİ XII. Bölge Müdürlüğü, Kayseri, 1-19. 1995.
- [31] Aksoy, A., Demirezen, D., 2003. Sultan Sazlığı ve Çevresindeki Sucul Ekosistemlerde Ağır Metal Kirliliğinin İncelenmesi. DPT Projesi.
- [32] U. Özsesmi ve İ. Gürer, Sultan Sazlığı: Biodiversity and natural resources management pilot GEF-II project in Turkey. *Journal of IUCN, USA*. 1-15. 2003.

- [33] T. Meriç ve S. Çağırnkaya, Sulak Alanlar. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürlüğü, Kayıhan Ajans, Ankara. 2013.
- [34] C.K. Ulusoy, M. Yılmaz, E. Erginöz and U.D. Tursun, Develi (Kayseri) Belediyesi, Yeraltısuyu Kullanımı ÇED Ön Araştırma Raporu. İller Bankası Genel Müdürlüğü İçmesuyu Dairesi Başkanlığı, Ankara, 8, 12-19, 33-36, 59-66, 74. 2003.
- [35] Topraksu Genel Müdürlüğü, Kayseri İli Toprak Kaynağı Envanter Raporu. Tarım Bak. Yay. No: 183. Topraksu Gn. Md. Yay. No: 268. Ankara. 1984.
- [36] F.E. Yıldız, Kayseri-Sultan Sazlığı Sulak Alanı'nda Yeraltı ve Yerüstü Suları İlişkisinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 218 s, Ankara. 2007.
- [37] D. W. Nelson and L. E. Sommers, Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. Chapter 34. In: J. M. Bigham et al. (ed.) Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series no. 5. Madison, WI. p 1001-1006, 1996.
- [38] G.R. Blake and K.H. Hartge, Bulk density. In: Klute, A., Ed., Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy—Soil Science Society of America, Madison, pp. 363-382. 1986.
- [39] G. Bouyoucos, Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. Agronomy Journal 54, 464-465. 1962. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- [40] A. Walkley and I.A. Black, An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. Soil Science, 63, 251-263. 1934. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
- [41] W.D. Kemper and R.C. Rosenau, Aggregate Stability and Size Distribution, In A. Klute et al., Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, 425-442, 2nd Edition, Agronomy Monograph, Soil Science of America, Madison, USA. 1986.
- [42] W. Pluske, D. Murphy and J. Sheppard, Note on Total organic carbon. <http://soilquality.org.au/factsheets/organic-carbon> (Accessed: 10.09.2019), 2013.
- [43] Zar, H.J., Biostatistical Analysis. 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey: 662 p. 1996.
- [44] J. Yang, J. Liu, X. Hua, X. Lia, Y. Wang and H. Li, Changes of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations under different land uses in marshes of Sanjiang Plain. Acta Ecologica Sinica, 33, 332-337. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.09.007>.
- [45] C. Santin, M. Gonzalez-Perez, X.L. Otero, P. Vidal-Torrado, F. Macias and M.A. Alvarez, Characterization of humic substances in salt marsh soils under sea rush (*Juncus maritimus*). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 79, (3), 541-548. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.05.007>.
- [46] F.K.L. Page and R.C. Dalal, Contribution of natural and drained wetland systems to carbon stocks, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, and CH<sub>4</sub> fluxes: an Australian perspective. Soil Research 49 (5), 377-388. 2011. <https://doi.org/10.1071/SR11024>.
- [47] M.Tufa, A. Melese and W. Tena, Effects of land use types on selected soil physical and chemical properties: The case of Kuyu District, Ethiopia. Eurasian Journal of Soil Science, 8 (2), 94 - 109. 2019. <https://doi.org/10.18393/ejss.510744>.
- [48] T. Dube and M. Chitiga, Human impacts on macrophyte diversity, water quality and some soil properties in the Madikane and Dufuya Wetlands of Lower Gweru, Zimbabwe. Appl. Ecol. Environ. Res. 9(1):85-99. 2011. [https://doi.org/10.15666/aeer/0901\\_085099](https://doi.org/10.15666/aeer/0901_085099).
- [49] Z.G. Mainuri and J.O. Owino, Effects of land use and management on aggregate stability and hydraulic conductivity of soils within River Njoro Watershed in Kenya. International Soil and Water Conservation Research, 1 (2), 80, 87. 2013. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30042-3](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30042-3).
- [50] E.C. Tommerup, The field description of the physical properties of soils, first commission of commission I—Soil Physics—of the International Society of Soil Science, pp. 155-158. International Society of Soil Science, Versailles, France. 1934.
- [51] M.K. Abbasi, M. Zafar and S.R. Khan, Influence of different land-cover types on the changes of selected soil properties in the mountain region of Rawalakot Azad Jammu and Kashmir. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 78 (1), 97-110. 2007. <https://doi.org/10.1007/s10705-006-9077-z>.
- [52] H.F. Dong, J.B. Yu, Z.G. Sun, X.J. Mu, X.B. Chen, P.L. Mao, C.F. Wu and B. Guan, Spatial distribution characteristics of organic carbon in the soil-plant systems in the Yellow River estuary tidal flat wetland. Environ Sci., 31, (6), 1594-1599. 2010.
- [53] IPCC,. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter Two: Generic Methodologies Applicable to Multiple Land Use Categories, [https://www.ipccngip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4\\_Volume4/19R\\_V4\\_Ch02\\_Generic%20Methods.pdf](https://www.ipccngip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Generic%20Methods.pdf) (Accessed: 15th, September 2020). 2019.







# Kaskat bir sistemin FTR sönümlenmeli kanallarda HQAM performans analizi

## Performance analysis of HQAM for a cascaded system over FTR fading channels

Caner Özen<sup>1</sup> , Mehmet Bilim<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 38090, Kayseri Türkiye

<sup>2</sup> Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38090, Kayseri Türkiye

### Öz

Bu çalışmada, kaskat yapıya sahip bir sistemin dalgalanmalı iki ışınlı (fluctuating two-ray, FTR) sönümlenmeye sahip kanallarda altıgen karesel genlik modülasyonu (hexagonal quadrature amplitude modulation, HQAM) analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde ele alınan sistemin olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) kullanılmıştır. Sunulan hata analizlerinde hem yaklaşık hata ifadesi hem de matematiksel olarak daha sade bir analiz için asimptotik hata ifadesi türetilmiştir. Ele alınan sistemin performans değerlendirmeleri farklı kaskat bağlantı sayıları, sönümlenme parametre değerleri, yansıtıcı parametre değerleri ve modülasyon seviyeleri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen yaklaşık analitik ve asimptotik ifadelerin doğruluğu tam nümerik sonuçlarla gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kaskat FTR sönümlenmesi, Hata olasılığı analizi, HQAM tekniği

### 1 Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde kapsama alanının geniş olması beklenen gerekliliklerdendir. Kapsama alanının geniş tutulması için ise çok atlamalı (multi-hop) sistem modelleri ve kaskat (cascaded) sönümlü kanal türleri ortaya çıkmıştır. Kaskat sönümlü kanal, birbirine seri bağlı kanalların birleşimi gibi düşünülmektedir. Son 20 yıllık süreç içerisinde, kaskat sönümlü kanal modelleri ile ilgili literatürde birçok çalışma yapılmıştır [1-9]. [1]'de verilen çalışmada kaskat bağlantı düzenine sahip bir sistemin Nakagami- $m$  sönümlenmesinde istatistiksel analizleri sunulmuştur. [2]'de verilen çalışmada kaskat genelleştirilmiş  $K$  sönümlenmesi ele alınırken, [3]'teki çalışmada bozuk radyo frekansı etkilerinin kaskat sönümlenmeli kanallarda incelemesi yapılmıştır. [4]'teki çalışmanın yazarları da hoyt sönümlenmesinin kaskat yapıda analizini gerçekleştirmişlerdir. Bir diğer çalışma olan [5]'te ise ultra yüksek frekanslı radyo frekansı tanımlama (ultra high frequency radio frequency identification, UHF RFID) sisteminin kaskat sönümlenmeli kanallardaki performans analizi yapılmıştır. Buna ilaveten, kaskat Rayleigh sönümlenmeli kanallarda araçlar arası çok atlamalı sistemin incelemesi [6]'daki çalışmada sunulmuştur.  $\alpha$ - $\mu$  sönümlenmesinde kaskat düzene sahip bir sistem analizi ise

### Abstract

In this study, performance analysis of a cascaded system with hexagonal quadrature amplitude modulation (HQAM) is performed over fluctuating two-ray (FTR) fading channels. The probability density function of the considered system is employed in the analysis. In the presented error analysis, both the approximate error expression and the asymptotic error expression for a simpler mathematical analysis are derived. Performance evaluations of the considered system are carried out for different number of cascade connections, fading parameter values, reflective parameter values and modulation levels. Finally, the accuracy of the analytical and asymptotic expressions obtained as a result of the analyses is shown with exact numerical results.

**Keywords:** Cascaded FTR fading, Error probability analysis, HQAM technique

[7]'deki çalışmada yapılmıştır. [7]'nin yazarları bir başka çalışma olan [8]'de kompozit  $\alpha$ - $\mu$  sönümlenmesinde çok yönlü yayılım ve gölgelemeli modellerin analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bir başka çalışma olan [9]'da ise kaskat  $\alpha$ - $\mu$  sönümlenmesinin güvenlik analizleri verilmiştir.

Öte yandan gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinden beklenen gerekliliklerden bir diğeri ise yüksek veri hızıdır [10-13]. Bu beklentiye de karesel genlik modülasyonu (quadrature amplitude modulation, QAM) tekniği yüksek oranda karşılayabilmektedir. QAM teknikleri içerisinde de farklı yıldız küme dağılımlarına sahip dikdörtgen (rectangular), çapraz (cross) ve altıgen (hexagonal) türleri bulunmaktadır. HQAM tekniği bu modellerden öne çıkan adaylardandır ve yüksek veri iletiminde oldukça başarılıdır [14-17]. Bu sebeple, HQAM tekniğinin farklı haberleşme sistemlerine ait uygulamaları yapılmıştır [18-24]. [18]'de verilen çalışmada, kuvvetlendirici ve aktar röleli bir ağın mükemmel olmayan kanal durum bilgisi ile HQAM hata analizi sunulmuştur. [19]'daki çalışmanın yazarı bir Gauss  $Q$  fonksiyonu yaklaşıklık sunmuş ve bunun uygulamasını HQAM analizi ile göstermiştir. Çok röleli bir ağın HQAM hata analizi ise [20]'de verilmektedir.  $\eta$ - $\mu$  sönümlenmesinde iki kollu seçme birleştirme tekniğini kullanan bir sistemin HQAM hata analizi detaylı olarak [21]'deki çalışmada verilmektedir.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mbilim@nyy.edu.tr (M. Bilim)

Geliş / Received: 10.12.2021 Kabul / Accepted: 28.01.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1034147



[22]'deki çalışmada alternatif Rician sönümlenmesinde, içerisinde HQAM'in de bulunduğu farklı QAM teknikleri analiz edilmiştir. Verici kısımda iletim anteni seçmeli ve alıcıda ise en büyük oranlı birleştirme tekniğini kullanan çok girişli çok çıkışlı bir sistemin Weibull sönümlü kanallarda HQAM hata analizi ise [23]'te verilmiştir. [24]'deki yazarlar, Fisher-Snedecor  $F$  sönümlenmesini dikkate alarak en büyük oranlı birleştirme tekniğini kullanan bir sistemin HQAM hata analizini sunmuşlardır.

Kaskat ve HQAM ile ilgili [1-9] ve [14-24]'te sunulan çalışmalar önemli olmasına rağmen hiçbiri kaskat dalgalanmalı iki ışınlı (fluctuating two-ray, FTR) kanallarda HQAM analizini ele almamıştır. [25-28]'de verilen çalışmalarda FTR kanalının band genişliği verimliliği açısından önemli bir yere sahip olacağı öngörüldüğünden ve milimetrik dalga iletişim için kullanılacağı düşünüldüğünden bu kanal modeli öne çıkmaktadır. Kaskat FTR sönümlü kanal modeli [29] ise hem band genişliği verimliliğine hem de kaskat bağlantılı geniş kapsama alanına sahiptir. Tüm bu açıklamalar doğrultusunda, bu çalışmada, kaskat FTR sönümlü kanallarda HQAM tekniğinin hata değerlendirmesi literatürde ilk kez gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple, HQAM performansı için hata ifadesi türetilmiştir. Analizleri kolaylaştırmak için, türetilen ifadeler sadeleştirilerek asimptotik ifade elde edilmiştir. Türetilen hata ifadelerinin yardımıyla bazı yeni nümerik sonuçlar sunulmuştur. Verilen sonuçlarda farklı kaskat bağlantı sayısı, farklı FTR parametre değerleri ve farklı modülasyon seviyeleri ele alınmıştır.

## 2 Sistem ve kanal modeli

Bu çalışmada, kaskat bir sistem yapısı ele alınmaktadır. Literatürden de bilindiği üzere, kaskat bağlantı düzeni özellikle kablosuz bir sistemin kapsama alanının genişletilmesi için tercih edilmektedir. Bu sebeple, ele alınan sistemin kaskat yapıda olması tercih edilmiştir. FTR sönümlenmeli kanallarda kaskat bir düzene ait sistemin alıcı taraftaki toplam alınan anlık işaret gürültü oranının (signal to noise ratio, SNR ( $\gamma$ )) olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) şu şekilde tanımlanmaktadır [29]:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\prod_{l=1}^N \Gamma(m_l)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{t_j}{j! \Gamma(j+1) (2\sigma^2)^{j+1}} \gamma^k e^{-\frac{\gamma}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Burada  $N$  kaskat düzendeki bağlantı sayısını,  $m_l$   $l$ . kaskat bağlantısına ait sönümlenme parametresini belirtmektedir. Buna ilaveten  $m_l$ , FTR sönümlenmesinde Nakagami- $m$  dağılımlı sönümlenme parametresidir.  $\Gamma(\cdot)$ , Gama fonksiyonu,  $\sigma^2$  ise gürültü varyansını belirtmektedir. Ayrıca, Denklem (1)'deki  $t_j$  parametresi ise

$$t_j = \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} \sum_{h=0}^k \binom{k}{h} \sum_{n=0}^w (-1)^{2n+2h-k} \left(\frac{\Delta}{2}\right)^{2n+2h} \chi(n, w, 2h-k) G_{1,N}^{N,1} \left( \frac{1}{K} \prod_{l=1}^N m_l \middle| 1 - (j+2h-k+2n) \right) \quad (2)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada  $K$  parametresi  $K = (V_1^2 + V_2^2) / 2\sigma^2$  şeklinde tanımlanır ve FTR sönümlenmesinde bulunan  $V_1$  ve  $V_2$  iki adet yansıtıcı bileşene bağlı olarak hesaplanan yansıtıcı oran parametresidir.  $w$  seri üst sınır parametresidir ve  $w \rightarrow \infty$  olduğunda sonsuz seriye yakınsamaktadır.  $\Delta = (2V_1V_2) / (V_1^2 + V_2^2)$  olarak tanımlanıp  $V_1$  ve  $V_2$  arasındaki ilişkiyi belirten bir parametredir.  $G(\cdot)$  ise Meijer's  $G$  fonksiyonudur. FTR sönümlenmesi için,  $\bar{\gamma}$ , ortalama SNR ifadesi

$$\bar{\gamma} = (E_b / N_0) 2\sigma^2 (1+K) \quad (3)$$

şeklinde dir. Burada  $E_b$  ve  $N_0$  ise sırasıyla enerji ve güç spektral yoğunluklarını belirtmektedir. Ayrıca Denklem (2)'deki  $\chi(\cdot)$  ise

$$\chi(n, w, 2h-k) = \frac{\Gamma(w+n)}{\Gamma(n+1)\Gamma(w-n+1)} \frac{w^{1-2n}}{\Gamma(2h-k+n+1)} \quad (4)$$

olarak hesaplanmaktadır. Kaskat düzene sahip bir sistemin FTR sönümlü kanallardaki olasılıksal fonksiyonları bulunurken çalışma [30]'da sunulan difüzyon güçlü iki dalgalı (two-wave with diffuse power, TWDP) sönümlenmesinden  $f_{nFTR} = \int_0^{\infty} f_{TWDP}(x; K = yK) f_Y(y) dy$  şeklinde faydalanılmıştır. Burada

$$f_Y(y) = \frac{y^{-1}}{\prod_{l=1}^N \Gamma(m_l)} G_{0,N}^{N,0} \left( y \prod_{l=1}^N m_l \middle| m_1, m_2, \dots, m_N \right) \quad (5)$$

ve

$$f_{TWDP}(x) = \exp(-K) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{K^j}{j!} \frac{x^j \exp(-\frac{x}{2\sigma^2})}{\Gamma(j+1) (2\sigma^2)^{j+1}} \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} \left(\frac{\Delta}{2}\right)^k \sum_{l=0}^k \binom{k}{l} I_{2l-k}(K\Delta) \quad (6)$$

olarak tanımlanmaktadır. Denklem (5) ve (6),  $f_{nFTR} = \int_0^{\infty} f_{TWDP}(x; K = yK) f_Y(y) dy$  ifadesinde yerine konulduğunda ve gerekli matematiksel işlemler

gerçekleştirildiğinde **Denklem (1)**'de verilen PDF ifadesi elde edilmektedir [29]. Böylelikle bu çalışmada, PDF temelli bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu PDF ifadesi kuramsal ifadelerde kullanılıp, gerekli hata ifadesi analizleri gerçekleştirilmektedir.

### 3 Performans analizleri

Kablosuz haberleşme sistemleri için kullanılan genel hata ifadesi

$$P_e = \int_0^{\infty} P(e|\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (7)$$

şeklinde. Burada  $P(e|\gamma)$  HQAM için toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise, AWGN) şartlarında koşullu hata ifadesini ve  $f_{\gamma}(\gamma)$  ise **Denklem (1)**'de verilen, ele alınan kaskat FTR sistem yapısı için PDF ifadesidir. Buradan hareketle bu çalışmada, HQAM analizinin yapılması hedeflendiğinden  $P(e|\gamma)$  koşullu hata ifadesi [14]

$$P(e|\gamma) = K_{NN} Q(\sqrt{\xi\gamma}) + \frac{2}{3} K_{NN} Q^2\left(\sqrt{\frac{2\xi\gamma}{3}}\right) - 2K_{CNN} Q(\sqrt{\xi\gamma}) Q\left(\sqrt{\frac{\xi\gamma}{3}}\right) \quad (8)$$

olarak verilmektedir. Burada  $\xi$ ,  $K_{NN}$  ve  $K_{CNN}$  parametrelerinin değerleri  $M$  modülasyon seviyesine göre değişim göstermektedir. Bu değerler **Tablo 1**'de verildiği gibidir. **Denklem (8)**'de verilen  $P(e|\gamma)$  koşullu hata ifadesini matematiksel olarak daha basit bir hale getirmek için Gauss  $Q$  fonksiyonunun ( $Q(\cdot)$ ) tek terimli üstel fonksiyon yaklaşıklığı olan Chernoff üst sınırı ( $Q(t) = \frac{1}{2} e^{-t^2/2}$ ) cinsinden yazıldığında aşağıda verilen yaklaşık ifade elde edilir:

$$P(e|\gamma) \approx \frac{K_{NN}}{2} e^{-\frac{\xi\gamma}{2}} + \frac{K_{NN}}{6} e^{-\frac{2\xi\gamma}{3}} - \frac{K_{CNN}}{2} e^{-\frac{2\xi\gamma}{3}} \quad (9)$$

Buradan, **Denklem (9)** ve **(1), (7)**'de yerine konulursa bu çalışmada yapılmak istenilen kaskat bir yapıya sahip sistemin FTR sönümlü kanallarda hata olasılığı integrali elde edilir. Buna göre  $P_e$

$$P_e \approx \int_0^{\infty} \left[ \frac{K_{NN}}{2} e^{-\frac{\xi\gamma}{2}} + \frac{K_{NN}}{6} e^{-\frac{2\xi\gamma}{3}} - \frac{K_{CNN}}{2} e^{-\frac{2\xi\gamma}{3}} \right] \times \frac{1}{\prod_{l=1}^N \Gamma(m_l)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{t_j}{j! \Gamma(j+1)} \gamma^k e^{-\frac{\gamma}{2\sigma^2}} d\gamma \quad (10)$$

**Tablo 1.**  $M$  değerlerine HQAM için  $P(e|\gamma)$ 'deki parametreler [14]

Modülasyon Seviyesi	$\xi$	$K_{NN}$	$K_{CNN}$
Optimum, $M=4$	1	5/2	3/2
Optimum, $M=8$	32/69	7/2	21/8
Optimum, $M=16$	8/35	33/8	27/8
Optimum, $M=32$	512/4503	75/16	33/8
Optimum, $M=64$	8/141	163/32	75/16
Çift Elmas, $M=8$	4/9	13/4	9/4
Codex/ESE SP14.4, $M=64$	32/567	81/16	297/64
HEX, $M=16$	2/9	33/8	27/8
Üçgensel, $M=16$	128/565	17/4	57/16
TQAM, $M=16$	2/9	33/8	27/8
TQAM, $M=64$	2/37	161/32	147/32
TQAM, $M=256$	2/149	705/128	675/128
Düzenli TQAM, $M=32$	8/71	75/16	33/8
Alt optimum TQAM, $M=32$	8/71	75/16	33/8
Düzensiz TQAM, $M=256$	8192/577595	711/128	171/32

şeklinde. **Denklem (10)** ile verilen ifade yeniden düzenlendiğinde

$$P_e \approx \frac{1}{\prod_{l=1}^N \Gamma(m_l)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{t_j}{j! \Gamma(j+1)} \frac{1}{(2\sigma^2)^{j+1}} \times \left[ \int_0^{\infty} \left[ \frac{K_{NN}}{2} e^{-\frac{\xi\gamma}{2}} \gamma^k e^{-\frac{\gamma}{2\sigma^2}} d\gamma \right] + \int_0^{\infty} \left[ \frac{K_{NN}}{6} e^{-\frac{2\xi\gamma}{3}} \gamma^k e^{-\frac{\gamma}{2\sigma^2}} d\gamma \right] - \int_0^{\infty} \left[ \frac{K_{CNN}}{2} e^{-\frac{2\xi\gamma}{3}} \gamma^k e^{-\frac{\gamma}{2\sigma^2}} d\gamma \right] \right] \quad (11)$$

olarak yazılır. **Denklem (11)**'de birbiriyle aynı formatta olan üç tane integral bulunmaktadır. Bu integrallerin her biri [31, 3.381.4] yardımıyla çözülebilmektedir. Buna göre hata olasılığı

$$P_e \approx \frac{1}{\prod_{l=1}^N \Gamma(m_l)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{t_j}{j! \Gamma(j+1)} \frac{1}{(2\sigma^2)^{j+1}} \times \left[ \frac{K_{NN}}{2} \left( \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{\xi}{2} \right)^{-(j+1)} \Gamma(j+1) + \frac{K_{NN}}{6} \left( \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{2\xi}{3} \right)^{-(j+1)} \Gamma(j+1) - \frac{K_{CNN}}{2} \left( \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{2\xi}{3} \right)^{-(j+1)} \Gamma(j+1) \right] \quad (12)$$

şeklinde türetilir. **Denklem (12)**'de verilen ifadeyi matematiksel olarak sadeleştirmek için **Denklem (9)**'daki  $P(e|\gamma)$  koşullu hata ifadesindeki  $Q^2(\cdot)$ 'li terimler etkisiz

varsayıldığında ([22]'de sunulan çalışmadaki gibi) ve  $j$  toplam indisi de 0 olarak belirlendiğinde

$$P_e^2 \approx \frac{1}{\prod_{l=1}^N \Gamma(m_l)} \times \frac{t_0}{\Gamma(1)2\sigma^2} \times \left[ \frac{K_{NN}}{2} \left( \frac{1}{2\sigma^2} + \frac{\xi}{2} \right)^{-1} \Gamma(1) \right] \quad (13)$$

olarak elde edilir. Denklem (13)'teki ifadenin yüksek SNR'daki davranışı analiz edilmek istenildiğinde ( $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ ) ifadedeki  $2\sigma^2 \rightarrow 0$  olmaktadır. Buna göre hata ifadesinin asimptotik hali

$$P_e^\infty \approx \frac{1}{\prod_{l=1}^N \Gamma(m_l)} \times \frac{t_0}{(2\sigma^2)} \times \frac{K_{NN}}{2} \left( \frac{\xi}{2} \right)^{-1} \quad (14)$$

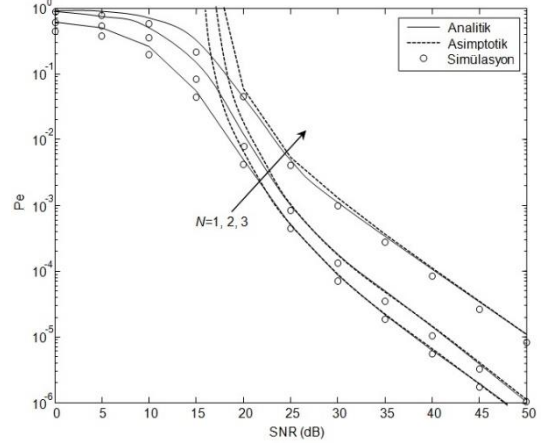
olarak elde edilir.

#### 4 Bulgular

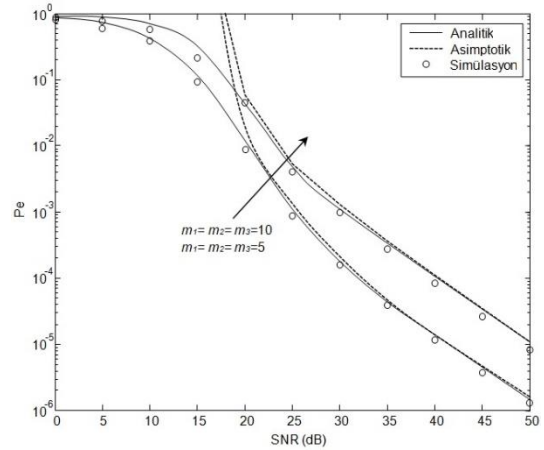
Bu kısımda üçüncü bölümde yapılan analizler sonucunda elde edilen Denklem (12) ve (14) kullanılarak bazı nümerik sonuçlar verilmiştir. Elde edilen nümerik sonuçlar dört farklı senaryo ile sunulmaya çalışılmıştır. Bunlardan ilki, kaskat bağlı yol sayının değişimini incelemektedir. Şekil 1'de kaskat bağlı yollara ait  $(m_1, m_2, m_3)$  Nakagami  $m$  sönümlenme parametresi değerleri 5 olarak alınmış,  $K=30$  ve  $\Delta=0.5$  olarak belirlenmiştir. Modülasyon seviyesi optimum 8 ve sonsuz seri toplamdaki üst sınır ise 20 olarak alınmıştır. Ayrıca yine elde edilen hata ifadelerindeki  $t_j$  katsayısındaki  $\chi(n, w, 2h-k)$  fonksiyonu için  $w$  ise 20 olarak alınmıştır. Şekil 1'den de görüldüğü gibi,  $N$  değeri arttıkça performans kötüleşmektedir. Ayrıca önceki bölümde sunulan analizler sonucunda elde edilen ifadelerin kullanılmasıyla ulaşılan analitik sonuçların, tam nümerik sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Burada tam nümerik sonuçlar simülasyonlara tekabül etmekte ve analiz gerçekleştirilirken çözülen integrallerin tam sonuçlarını temsil etmektedir.

Şekil 2'de ise kaskat bağlantı sayısı  $N=3$  olarak belirlenmiş,  $K=30$  ve  $\Delta=0.5$  olarak alınmıştır. Yine modülasyon seviyesi optimum 8,  $w=20$  ve sonsuz seri toplamdaki üst sınır ise 20 olarak kabul edilmiştir. Bu senaryoda ise farklı Nakagami- $m$  sönümlenme değerlerinin kıyaslaması yapılmaktadır. 3 bağlantılı kaskat yapıdaki bütün Nakagami- $m$  sönümlenme değerlerinin eşit ve sırasıyla  $m_1 = m_2 = m_3 = 5$  ve  $m_1 = m_2 = m_3 = 10$  olarak alınmıştır. Literatürdeki çalışma örneklerinde olduğu gibi,  $m$  sönümlenme parametresinin değeri arttıkça hata değeri azalmakta ve sistemin performansı artmaktadır. Bu gerçeklik, Şekil 2'deki sonuçlarda da gözlemlenmektedir.  $m_1 = m_2 = m_3 = 10$  olarak alındığı durumdaki hata performansının  $m_1 = m_2 = m_3 = 5$  olarak alınan durumdaki

hata performansından daha iyi olduğu görülmektedir. Özellikle, ortalama SNR değerinin 10 dB ve yukarısındaki değerlerde bu iyileşme daha çok göze çarpmaktadır. Bu senaryoda da analitik ve asimptotik sonuçlar ile tam simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir.

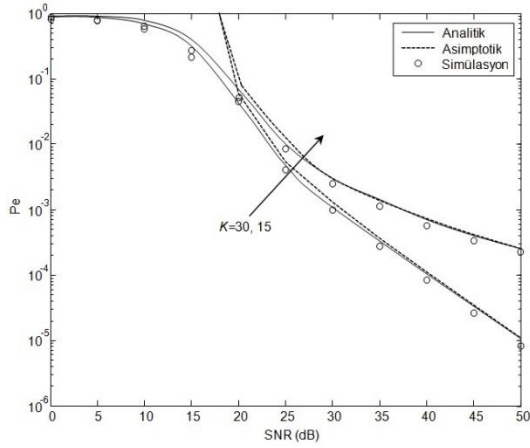


Şekil 1. Farklı kaskat bağlantı sayıları için hata performans kıyaslaması

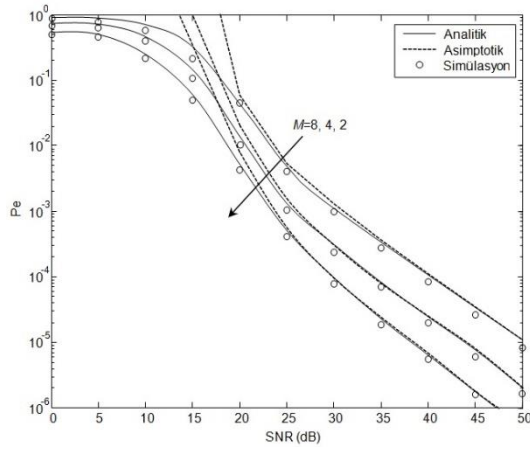


Şekil 2. Kaskat bağlantılardaki farklı  $m$  değerleri için hata performansı kıyaslaması

Şekil 3'teki senaryoda FTR sönümlü kanallarda iki yansıtıcı bileşene bağlı olarak hesaplanan yansıtıcı oran parametresi  $K$ 'nın sırasıyla 15 ve 30 olduğu değerlerin hata performans kıyaslaması sunulmuştur. Burada yine kaskat bağlantı sayısı  $N=3$ ,  $\Delta=0.5$ ,  $m_1 = m_2 = m_3 = 5$ , modülasyon seviyesi optimum 8,  $w=20$  ve sonsuz seri toplamdaki üst sınır ise 20 olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlarda literatürdeki FTR sönümlü kanallarda yapılan sonuçlara benzer şekilde,  $K$  değeri arttıkça sönümlenme etkisinin azaldığı ve buna paralel olarak incelenen sistemin hata performansının iyileştiği açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 2'deki sonuçlara benzer şekilde, buradaki senaryoda da ortalama SNR'nin 10 dB'yi geçtikten sonra bahsedilen bu iyileşme belirgin şekilde dikkati çekmektedir. Şekil 3'teki sonuçlar gözönüne alındığında analitik ve asimptotik sonuçların yine tam simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3. Farklı  $K$  değerleri için hata performans kıyaslaması



Şekil 4. Farklı modülasyon seviyeleri için hata performansı kıyaslaması

Bu çalışmada sunulan son senaryo olan Şekil 4'te ise farklı modülasyon seviyelerinin kıyaslaması verilmektedir. Burada da kaskat bağlantı sayısı  $N=3$ ,  $\Delta=0.5$ ,  $m_1=m_2=m_3=5$ ,  $K=30$ ,  $w=20$  ve sonsuz seri toplamdaki üst sınır ise 20 olarak alınmıştır. Farklı modülasyon seviyesine sahip (2-HQAM, 4-HQAM ve 8-HQAM) kaskat sistemlerinin beklenildiği gibi hata performanslarının da farklı olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalardan da bilindiği üzere, düşük modülasyon seviyesine sahip sistemin hata performansının daha üstün olması beklenmektedir. Bu durum, bu senaryoda açık bir şekilde görülmektedir. Düşük modülasyon seviyesi olduğunda komşu bitlerin birbirlerine olan yakınlığı daha az olacak ve bu da algılamada daha az hata yapma olasılığını ortaya çıkaracaktır. Bu sebeple, bu senaryoda en iyi hata performansı modülasyon seviyesi 2 olan sisteme ait olup, en kötü hata performansı ise modülasyon seviyesi 8 olan sisteme aittir. Daha önceki senaryolarda olduğu gibi, burada da hata analizleri sonucunda türetilen analitik ve asimptotik eşitlikler kullanılarak elde edilen sonuçların tam simülasyonlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 1-4'te verilen sonuçlardaki bu uyum yapılan hata analizlerinin doğruluğunu göstermektedir.

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, HQAM kullanan kaskat bağlantı düzenine sahip bir sistemin FTR sönümlenmeli kanallarda hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Hata analizleri yapılırken matematiksel olarak kullanım kolaylığından dolayı Chernoff Gauss  $Q$  fonksiyonu yaklaşıklığından ve sistemin PDF ifadelerinden faydalanılmıştır. Yapılan analizleri matematiksel olarak daha basit bir formda elde etmek için asimptotik ifade de türetilmiştir. Ele alınan sistem için temel parametreler olan kaskat bağlantı sayısı, sönümlenme parametresi, yansıtıcı oran parametresi ve modülasyon seviyesi gibi değerlerin sistem üzerindeki etkileri gösterilmeye çalışılmıştır. Literatüre uygun bir şekilde bahsi geçen parametre değişimlerinin etkileri ele alınan kaskat sistem üzerinde de görülmüştür. Yapılan analizlerin geçerliliği ise analizlerdeki ifadelerin tam nümerik sonuçlarının kıyaslaması ile verilmiştir. Son olarak FTR yeni bir sönümlenme modeli olduğu için gelecekte, iki kollu, çok atlamalı iletişim, uyarlanabilir akıllı yüzey destekli iletişim gibi farklı sistem modellerine adapte edilerek yeni çalışmalar ortaya konulabilir.

## Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

**Benzerlik oranı (iThenticate):** % 11

## Kaynaklar

- [1] G. K. Karagiannidis, N. C. Sagias, and P. T. Mathiopoulos,  $N^*$ Nakagami: A novel stochastic model for cascaded fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 55 (8), 1453-1458, 2007. doi: [10.1109/TCOMM.2007.902497](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2007.902497).
- [2] K. Peppas, F. Lazarakis, A. Alexandridis, and K. Dangakis, Cascaded generalized- $K$  fading channel. *IET Communications*, 4 (1), 116-124, 2010. doi: [10.1049/iet-com.2009.0107](https://doi.org/10.1049/iet-com.2009.0107)
- [3] A.-A. A. Boulogeorgos, P. C. Sofotasios, B. Selim, S. Muhaidat, G. K. Karagiannidis, and M. Valkama, Effects of RF impairments in communications over cascaded fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65 (11), 8878-8894, 2016. doi: [10.1109/TVT.2016.2516901](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2516901).
- [4] N. Hajri, N. Youssef, T. Kawabata, M. Pätzold, and W. Dahech, Statistical properties of double Hoyt fading with applications to the performance analysis of wireless communication systems. *IEEE Access*, 6, 19597-19609, 2018. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2820746](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2820746).
- [5] A. Bekkali, S. Zou, A. Kadri, M. Crisp, and R. V. Penty, Performance analysis of passive UHF RFID systems under cascaded fading channels and interference effects. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14 (3), 1421-1433, 2015. doi: [10.1109/TWC.2014.2366142](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2366142).
- [6] Y. Alghorani, G. Kaddoum, S. Muhaidat, S. Pierre, and N. Al-Dhahir, On the performance of multihop-intervehicular communications systems over  $n^*$ Rayleigh fading channels. *IEEE Wireless*



- Communications Letters, 5 (2), 116-119, 2016. doi: [10.1109/LWC.2015.2505308](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2505308).
- [7] E. J. Leonardo and M. D. Yacoub, Product of  $\alpha$ - $\mu$  variates. IEEE Wireless Communications Letters, 4 (6), 637–640, 2015. doi: [10.1109/LWC.2015.2476791](https://doi.org/10.1109/LWC.2015.2476791).
- [8] E. J. Leonardo and M. D. Yacoub, The product of two  $\alpha$ - $\mu$  variates and the composite  $\alpha$ - $\mu$  multipath-shadowing model. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64 (6), 2720–2725, 2015. doi: [10.1109/TVT.2014.2342611](https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2342611).
- [9] L. Kong, G. Kaddoum, and D. B. da Costa, Cascaded  $\alpha$ - $\mu$  fading channels: reliability and security analysis. IEEE Access, 6, 41978–41992, 2018. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2833423](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2833423).
- [10] M. K. Simon and M-S. Alouini, Digital communication over fading channels. 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: IEEE: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [11] J. Rischke, P. Sossalla, S. Itting, F. H. P. Fitzek and M. Reisslein, 5G campus networks: a first measurement study. IEEE Access, 9, 121786-121803, 2021. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3108423](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3108423).
- [12] L. -H. He, Y. -L. Ban and G. Wu, Dual-band quad-polarized transmitarray for 5G mm-wave application. IEEE Access, 9, 117520-117526, 2021. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3106949](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3106949).
- [13] M. Bilim and N. Kapucu, Average symbol error rate analysis of QAM schemes over millimeter wave fluctuating two-ray fading channels. IEEE Access, 7, 105746-105754, 2019. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2932147](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932147).
- [14] L. Rugini, Symbol error probability of hexagonal QAM. IEEE Communications Letters, 20 (8), 1523-1526, 2016. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2574343](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2574343).
- [15] M. K. Simon and J. G. Smith, Hexagonal multiple phase-and amplitude-shift-keyed signal sets. IEEE Transactions on Communications, 21 (10), 1108–1115, 1973. doi: [10.1109/TCOM.1973.1091549](https://doi.org/10.1109/TCOM.1973.1091549).
- [16] S. Hosur, M. F. Mansour, and J. C. Roh, Hexagonal constellations for small cell communication. in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), sayfa 3270–3275, Atlanta, GA, USA, 2013. doi: [10.1109/GLOCOM.2013.6831576](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2013.6831576).
- [17] J. Lee, D. Yoon, and K. Cho, Error performance analysis of  $M$ -ary  $\theta$ -QAM. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61 (3), 1423–1427, 2012. doi: [10.1109/TVT.2012.2186835](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2186835).
- [18] P. K. Singya, N. Kumar and V. Bhatia, Impact of imperfect CSI on ASER of hexagonal and rectangular QAM for AF relaying network. IEEE Communications Letters, 22 (2), 428-431, 2018. doi: [10.1109/LCOMM.2017.2778153](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2778153).
- [19] D. Sadhwani, R. N. Yadav and S. Aggarwal, Tighter bounds on the Gaussian  $Q$  function and its application in Nakagami- $m$  fading channel. IEEE Wireless Communications Letters, 6 (5), 574-577, 2017. doi: [10.1109/LWC.2017.2717907](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2717907).
- [20] N. Kumar, P. K. Singya and V. Bhatia, ASER analysis of hexagonal and rectangular QAM schemes in multiple-relay networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67 (2), 1815-1819, 2018. doi: [10.1109/TVT.2017.2758028](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2758028).
- [21] Bilim, M., Dual-branch SC wireless systems with HQAM for beyond 5G over  $\eta$ - $\mu$  fading channels. Peer-to-Peer Networking and Applications, 14, 305-318, 2021. doi: [10.1007/s12083-020-00946-x](https://doi.org/10.1007/s12083-020-00946-x).
- [22] Bilim, M., Different QAM Schemes analyses for ARS fading channels. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 32 (1), e4119, 2021. doi: [10.1002/ett.4119](https://doi.org/10.1002/ett.4119).
- [23] Bilim M., Altıgen kareleme genlik modülasyonu kullanan MIMO TAS/MRC sistemlerin Weibull sönümlenmeli kanallardaki hata analizi değerlendirmesi. EEMKON 19, Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi, sayfa 410-413, 2019, Türkiye.
- [24] C Özen, M Bilim HQAM Analysis of MRC Diversity Systems over Fisher-Snedecor  $F$  Channels. 29th Signal Processing and Communications Applications Conference, sayfa 1-4, 2021, Türkiye. doi: [10.1109/SIU53274.2021.9477903](https://doi.org/10.1109/SIU53274.2021.9477903).
- [25] J. M. Romero-Jerez, F. J. Lopez-Martinez, J. F. Paris and A. J. Goldsmith, The fluctuating two-ray fading model: statistical characterization and performance analysis. IEEE Transactions on Wireless Communications, 16 (7), 4420-4432, 2017. doi: [10.1109/TWC.2017.2698445](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2698445).
- [26] J. Zhang, W. Zeng, X. Li, Q. Sun and K. P. Peppas, New results on the fluctuating two-ray model with arbitrary fading parameters and its applications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, c. 67, no. 3, s. 2766-2770, 2018. doi: [10.1109/TVT.2017.2766784](https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2766784).
- [27] W. Zeng, J. Zhang, S. Chen, K. P. Peppas and B. Ai, Physical layer security over fluctuating two-ray fading channels. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67 (9), 8949-8953, 2018. doi: [10.1109/TVT.2018.2842126](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2842126).
- [28] J. Zheng, J. Zhang, G. Pan, J. Cheng and B. Ai, Sum of squared fluctuating two-ray random variables with wireless applications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68 (8), 8173-8177, 2019. doi: [10.1109/TVT.2019.2920533](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2920533).
- [29] O. S. Badarneh and D. B. da Costa, Cascaded fluctuating two-ray fading channels. IEEE Communications Letters, 23 (9), 1497-1500, 2019. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2926982](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2926982).
- [30] G. D. Durgin, T. S. Rappaport, and D. A. de Wolf, New analytical models and probability density functions for fading in wireless communications. IEEE Transactions on Communications, 50 (6), 1005–1015, 2002. doi: [10.1109/TCOMM.2002.1010620](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.1010620).
- [31] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, Table of Integrals, Series and Products. 6th ed. New York, NY, USA: Academic, 2000.







## TETRA baz istasyonları arasında frekans planlaması

### Frequency plannig between TETRA base stations

Şakir Yılmaz<sup>1,\*</sup>, Çağatay Aydın<sup>2</sup>, Doğu Çağdaş Atilla<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Altınbaş Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34100, İstanbul Türkiye  
<sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir Türkiye

#### Öz

Günümüzde kısıtlı frekans kaynaklarının tekrarlanarak kullanılması frekans planlama açısından ciddi önem arz etmektedir. Özellikle kritik ses haberleşmesinde daha az baz istasyonu ile daha fazla alan kapsanmak istendiğinde frekans tekrarı sorunu daha çok göze batmaktadır. Bu makalede kritik ses haberleşmesi teknolojilerinden olan Karasal Trunk Telsiz sistemi (Terrestrial Trunk Radio, TETRA) üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Baz istasyonları konumları, yayın yaptığı frekans bilgisi, baz istasyonu çıkış gücü, sisteme ait bant genişliği göz önüne alınarak komşu kanal ve ortak kanal girişimleri incelenmiştir. Sayısal telsiz sisteminde mevcut hesapların yetersiz kaldığı ve bu hesaplara ek olarak komşuluk ilişkilerinin de frekans planlamada önemli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca konuşma trafiği yoğunluğu (Erlang) incelenerek sistemde işlevsiz kullanılan frekanslar tespit edilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** TETRA, Frekans planlama, Frekans tekrarı frekans atama, İnterferans

#### 1 Giriş

Frekans planlama ihtiyacı ilk olarak kablosuz haberleşme sistemlerinin artması ile ortaya çıkmıştır. Farklı sistemlerin (TV, radyo, GSM vb.) kullanmış olduğu frekansların birbirini etkilemesi ile haberleşme kalitesinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu sebeple bu sorunu çözüme kavuşturacak farklı yöntemler ortaya atılmıştır. Bu çözümler daha çok sorunun ana kaynağı olan girişim problemi üzerine kurgulanmıştır. [1, 2]

Frekans planlama sorunu için üretilen ilk çözüm her sistem için belirli frekans aralığı tahsis edilmesi şeklinde olmuştur. [3] Fakat kablosuz haberleşme yapan ekipmanların yaygınlaşması ile birlikte frekans kaynağı tükenme noktasına gelmiştir. İşte bu noktada mevcut frekansları iyi bir planlama ile farklı bölgelerde tekrar kullanma (frequency reuse) gündeme gelmiştir. [1]

Frekans planlama probleminin çözümünü karmaşık duruma getiren en önemli faktörler, baz istasyonlarının konumlandığı bölge, kullanılan anten türü ve kapsama sağlayabilmek adına baz istasyonlarının sağladığı çıkış güçleridir. [4]

Bu makalede TETRA standartları ve uygulama yapılan TETRA sisteminin çalışma mantığı dikkate alınarak konuşma trafiği yoğunluğu (Erlang), girişim (interferans) olayı ve sistemdeki komşuluk ilişkileri incelenecektir. Elde

#### Abstract

Frequency reuse is necessary for wireless communications due to limited frequency. Especially, mission critical communication users usually want to communicate in a wide area with minimum number of base stations. This request increases the frequency demand and this problem could be solved by RF optimization and frequency planning in order to reuse frequencies. This paper suggests a frequency plan to a TETRA system by analyzing traffic load, interference and using neighborhood between base stations.

**Keywords:** TETRA, Frequency planning, Frequency reuse, adjacent and co channel interference

edilen veriler ışığında mevcut frekanslar ile uygulama yapılan sistemde kullanılan baz istasyonlarına uygun frekans ataması yapılacaktır

#### 2 Materyal ve metod

##### 2.1 TETRA sistemine genel bakış

İlk olarak 1997 yılında görülen TETRA sistemi, acil durumlarda haberleşme ihtiyacını gidermek için tasarlanmıştır. ETSI tarafından belirlenen frekansları kullanarak sabit 25 Khz band genişliğinde haberleşme sağlamaktadır. TETRA için tahsis edilen 25 Khz band genişliğindeki her bir frekans zaman bölmeli çoğullama (TDMA) tekniği ile dört zaman dilimine (time-slot) bölünmüştür. Bu sayede tek bir frekans üzerinden aynı anda dört farklı ses/veri trafiği aktarımı sağlanmaktadır. [5]

TETRA sistemi temel olarak anahtarlama ve yönetim merkezi (SwMI, switching and management infrastructure), bu merkeze bağlı baz istasyonları ve son kullanıcıya tahsis edilen telsiz ekipmanlarından oluşmaktadır. SwMI, baz istasyonlarına ait bilgiler ile abonelere ait kullanıcı kimlik (ISSI) ve grup kimlik (GSSI) bilgilerini yönetmektedir. SwMI aynı zamanda baz istasyonlarını birbirine bağladığı için geniş alan kapsamında önemli rol almaktadır.

TETRA baz istasyonu anahtarlama merkezinden aldığı frekans bilgisine göre aşağı bağlantı (downlink) kanalından

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: geniusx31@yahoo.com (Ş. Yılmaz)

Geliş / Recieved: 02.11.2021 Kabul / Accepted: 12.02.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1017751

yayın yapmaktadır. Baz istasyonuna bağlanmak isteyen bir telsiz öncelikle aldığı frekansa göre kendi yukarı bağlantı (uplink) frekansını ayarlayarak baz istasyonuna istek gönderir. Baz istasyonu telsizin gönderdiği bu isteği anahtarlama merkezine sorarak abone bilgilerini alır. İstek gönderen telsiz sisteme kayıtlı ise telsizin isteği kabul edilerek telsize baz istasyonunda kanal ataması yapılır. Baz istasyonuna bağlanan telsize hücre kimlik bilgisi (location area - LA), komşu baz istasyonları bilgisi ile baz istasyonları arası geçiş (handover) için gerekli parametre bilgileri gönderilir. Telsiz bağlandığı baz istasyonuna ait sinyal haricinde algıladığı sinyalleri kendisine gelen LA bilgileri ile eşleştirir. Telsize ulaşan sinyal baz istasyonunda ayarlı erişim seviyesinden (RxA) daha düşük ise telsiz farklı bir baz istasyonu ile bağlantı kurmak için listesindeki frekansları tarar. [6].

## 2.2 Frekans planlama kriterleri

Bu çalışmada frekans planlama için konuşma trafiği yoğunluğu ve frekanslar arası girişim olmak üzere iki temel kriter göz önüne alınmıştır. Uygulama yapılan sisteme ait baz istasyonları dağılımı ve bu baz istasyonlarına ait LA numaraları Şekil 1’ de gösterilmiştir.



Şekil 1. Uygulama yapılan sisteme ait baz istasyonu dağılımı

### 2.2.1 Konuşma trafiği yoğunluğu

Konuşma trafiği yoğunluğu bir baz istasyonundaki ortalama kanal ihtiyacını belirlemektedir. TETRA sisteminde her 4 kanal bir adet frekansa karşılık geldiğinden ortalama kanal ihtiyacı bir baz istasyonuna atanacak frekans sayısını belirlemektedir.

Bu çalışmada kullanılan sistemdeki 10 adet baz istasyonu 8 kanal, bir adet baz istasyonu ise 4 kanal yapısı kullanılmaktadır. Konuşma trafiğinin az olduğu bölgelerde 8 kanal yerine 4 kanal yapısına geçmek frekans tekrarı yapılması hususunda ciddi avantaj sağlayacaktır.

Konuşma trafiği yoğunluğunu hesaplamak için Erlang formülü kullanılmaktadır. Literatürde Erlang B ve Erlang C olmak üzere bilinen 2 adet Erlang formülü vardır. TETRA sistemi temelde çağrı bekleme servisi kullandığından dolayı TETRA sisteminde Denklem (1)’ de gösterilen Erlang C formülü tercih edilmektedir. [7, 8]

$$P_0 = \frac{A^N}{A^N + \left[ N! \left( \frac{N-A}{N} \right) \sum_{X=0}^{N-1} \frac{A^X}{X!} \right]} \quad (1)$$

A: Trafik Yoğunluğu (Erlang), N: Ortalama kanal sayısı, P<sub>0</sub>: Çağrı bekleme olasılığı, X: Anlık kanal sayısı

Denklem (1) de belirtilen trafik yoğunluğu hesabı Denklem (2)’ de gösterilen formül ile yapılmaktadır.

$$A = U\lambda Hn \quad (2)$$

U: Baz istasyonu başına kanal sayısı, λ: Yoğun saatlerde abone başına düşen çağrı talebi, H: Ortalama çağrı süresi, n: Bir grup çağrısı için kullanılan baz istasyonu sayısı

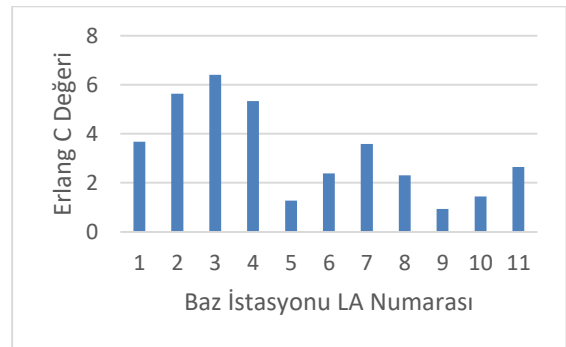
Normal çağrı bekleme süresinin aşılması durumunda çağrı bloke edilir. Bekletilen çağrılarının çağrı bekleme süresi içinde kaynak atama olasılığı servis derecesi (GoS, Grade of Services) olarak tanımlanır ve P<sub>T</sub> ile gösterilir. P<sub>T</sub>, Denklem (3)’ te gösterilen formül ile hesap edilmektedir.

$$P(W > T) = P_T = P_0 e^{\frac{(N-A)T}{H}} \quad (3)$$

W: İlk giren ilk çıkar (First in First out, FIFO) kuyruk modeline göre çağrı bekleme süresi, T: Kuyrukta bekleme süresi, N: Ortalama kanal sayısı, P<sub>0</sub>: Çağrı bekleme olasılığı

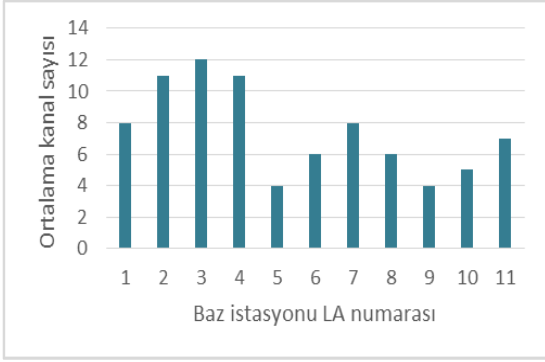
Tipik bir telsiz iletişim ağında GoS=%5 ve T=5 sn olarak kabul edilmektedir. [9]

Bu makale kapsamında uygulama yapılan sistemde 11 adet baz istasyonu bulunmaktadır. Bu baz istasyonlarının yoğun olarak kullanıldığı 3 güne ait 24 saatlik çağrı kayıtları Rohill firmasına ait detaylı çağrı kaydı (CDR, Call Detail Record) yazılımı üzerinden analiz edilmiştir. Şekil 2’de her bir baz istasyonu için yapılan analiz sonucu gösterilmiştir.



Şekil 2. Trafik yoğunluğu analiz sonucu

Erlang C tablosu üzerinden Şekil 2’deki veriler kullanılarak %5 GoS değerinde her bir baz istasyonu için ortalama kanal ihtiyacı Şekil 3’te gösterilen grafikte verilmiştir. Grafığe göre 5 ve 9 no.lu baz istasyonları haricinde kalan baz istasyonlarında mevcut kanal sayılarının azaltılamayacağı görülmektedir. Uygulama yapılan sistemde 5 no.lu baz istasyonu için kullanım oranının artacağı bildirilmiştir. Bu sebeple uygulama yapılan sistemde sadece 9 no.lu baz istasyonunda kanal azaltılabileceği görülmektedir.



Şekil 3. Trafik yoğunluğuna göre ortalama kanal sayısı

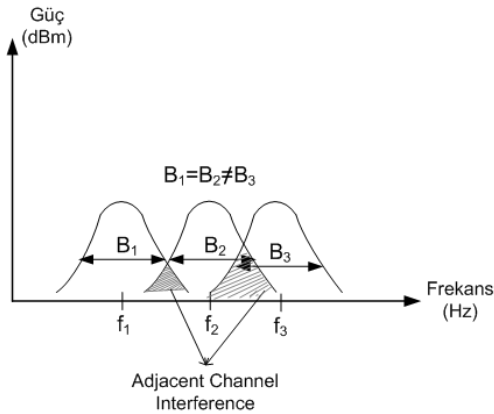
### 2.2.2 Girişim (Interferans)

Girişim mobil haberleşmede alıcı tarafında yaşanan bir sorun olarak ortaya çıkar. Genel ifade ile istenilmeyen bir sinyalin istenilen sinyali bozması olayıdır. Girişim, trafik kanalında arka plan gürültüsü ve bağımsız iki konuşma kanalı arasındaki konuşmaların birbiri üzerine binmesine; kontrol kanalında ise abonenin bağlantıyı kaybetmesine neden olur. [10]

Girişim olayı komşu kanal girişimi ve ortak kanal girişimi olmak üzere iki farklı bölümde incelenmektedir.

#### 2.2.2.1 Komşu kanal girişimi (Adjacent channel interference)

Komşu kanal girişimi aynı ya da farklı bant genişliğine sahip olan ardışık iki frekansın birbirleri ile girişmesi olayıdır. Bu durum aslında Şekil 4'te de gösterildiği gibi uygulamada kullanılan filtrelerin ideal olmamasından kaynaklanmaktadır.

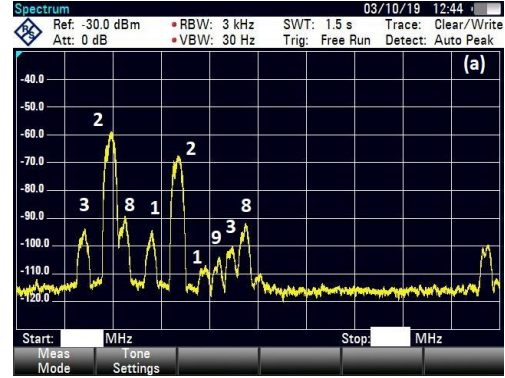


Şekil 4. Uygulamadaki Filtre Çıkışı

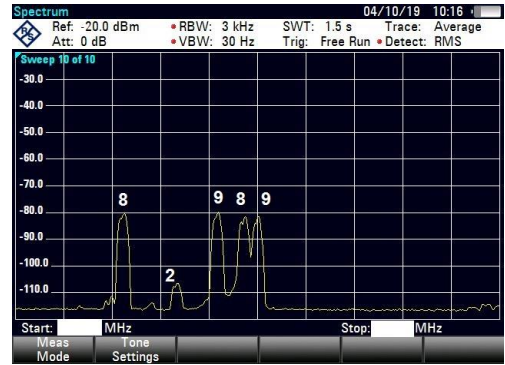
TETRA sisteminde girişime sebep olan komşu kanal gücünün servis alınan kanal gücünden en az 45 dB daha düşük olması durumunda komşu kanal girişimi etkileri iletişim açısından bir sorun oluşturmamaktadır [6]. Uygulama yapılan sistemde bu sınır değerinin daha çok direkt görüş açısı (Line of Sight, LoS) bölgelerinde sağlanamadığı görülmüştür. Bu sebeple bu makalede yapılan hesaplar LoS bölgelerine göre yapılmıştır.

Uygulama yapılan sistemde 1 ve 2 nolu bölgelerdeki LoS bölgelerinden alınan ölçüm sonuçları Şekil 5 ve 6' da

gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere komşu kanal girişimi en fazla frekansların birbirine yakın olması ve konumu itibarıyla sinyal zayıflamasının az olduğu 8 ile 9 ve 2 ile 8 numaralı baz istasyonları arasında yaşanmaktadır.

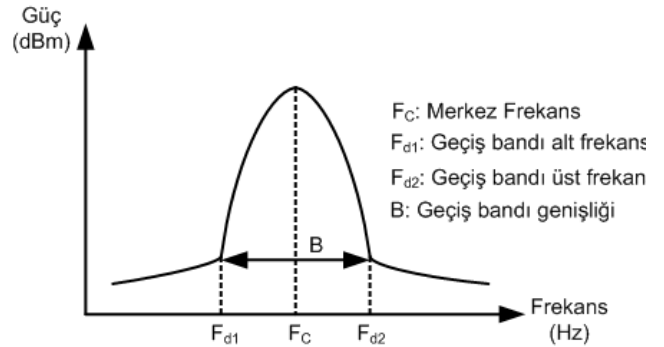


Şekil 5. 1. Bölge ardışık kanal girişimini gösteren örnek ölçüm



Şekil 6. 2. Bölge ardışık kanal girişimini gösteren örnek ölçüm

Komşu kanal girişimini engellemek için iki frekans arasında koruma bandı kullanılması tercih edilmektedir. Koruma bandı ataması yapılırken filtreye ait Şekil 7' de gösterilen geçiş bandı genişliğinin bilinmesi ve mobil haberleşmede doppler olayının incelenmesi gerekmektedir. [11, 12]



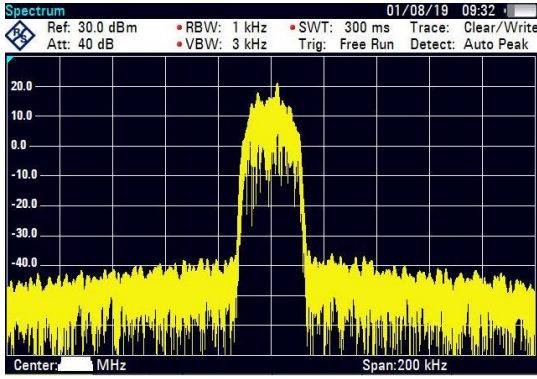
Şekil 7. Geçiş bandı genişliğinin gösterimi

Koruma bandı ataması yapılırken Şekil 7'de gösterilen geçiş bandı genişliğinin yarısı (B/2) 25 kHz ve üzerinde ise Denklem (4)'teki bağıntı kullanılır. (B/2)<25kHz için yayın

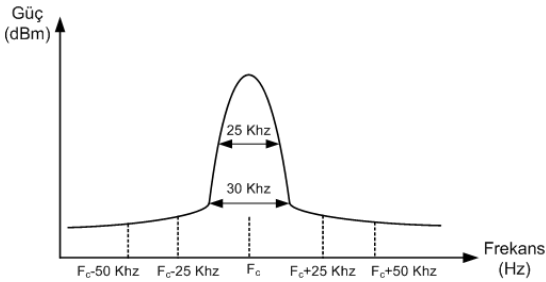
yapacak ardışık iki frekans arasına en az 25 kHz koruma bandı atanması tavsiye edilmektedir. [13]

$$Koruma\ Bandı = 2(F_{d2} - F_c) \quad (4)$$

Bu çalışmada kullanılan sisteme ait kavite filtrenin spektrum analizör ile ölçülen çıkışı Şekil 8 ve Şekil 9'de gösterilmiştir. Şekil 9'dan da görüleceği üzere sisteme ait filtre çıkışında  $(B/2) < 25\text{kHz}$  olduğu için ardışık iki frekans arasına 25 kHz koruma bandı atanması uygun olacaktır. Bu sebeple frekans planında ardışık iki frekans arasına en az 50 kHz fark konulması gerekmektedir.



Şekil 8. Çalışma yapılan sistem ait filtrenin spektrum gösterimi



Şekil 9. Çalışma yapılan sisteme ait filtrenin grafiksel gösterimi

Koruma bandı atamasında önemli olan bir diğer nokta Doppler etkisidir. Doppler etkisinden kaynaklı frekans kaymasını hesap etmek için Denklem (5)'teki bağıntı kullanılmaktadır. [6]

$$f_d = v \frac{f_c}{c} \quad (5)$$

$f_d$ : Doppler Frekansı,  $c$ : Işık Hızı,  $v$ : Mobil alıcı/verici hızı,  $f_c$ : Verici merkez frekansı

Bu makale kapsamında çalışma yapılan sistemde 410-430 MHz frekans bandı kullanılmakta olup mobil cihazların 90 km/sa hız ile hareket ettiği öngörülmektedir. Bu bilgiler ışığında Doppler frekans kayması 35 Hz civarında olmaktadır. Bu değer 25 kHz değerinden küçük olduğu için doppler olayı bu çalışmada ihmal edilmiştir.

### 2.2.2.2 Ortak kanal girişimi (Co-channel interference)

Aynı frekansın farklı iki baz istasyonunda kullanılması sebebi ile ortaya çıkan bu girişim türü frekans tekrarı probleminin ana nedenini oluşturmaktadır. GSM sektöründe bu sorun altı farklı şekilde modellenmiştir [14]. Her birine ait ayrı bir çözüm olmasına karşın bu makalede sadece çoklu girişim oluşturucu hücrelerle coğrafik modelleme (Geographical Model with Several Tiers of Interferers) kullanılmıştır.

Genel ifade ile frekans tekrar kullanım faktörü (cluster size) Denklem 6'da gösterilen bağıntı yardımı ile hesap edilmektedir [15].

$$N_R = \frac{1}{3} \left[ MKA \left( \frac{C}{I} \right)_T \right]^{\frac{2}{\alpha}} \quad (6)$$

M: Uzun dönemli sönmüleme etkisi (Slow fading effect), K: Hücre geometrisi ve girişim oluşturan hücre sayısına bağlı etken, A: Aktivite etkeni,  $\alpha$ : Yayılım sembolü,  $(C/I)_T$ : Kabul edilebilir girişim oranı

TETRA standartlarında;

$\alpha=3.5$ , TU50 koşuluna göre,  $K=7$ , TU50 ve  $\alpha=0.35$  koşuluna göre,  $M= 6-12$  dB, %90 kapsama alanı koşuluna göre 8 dB,  $(C/I)_T= 19$  dB,  $A=1$

Tekrar kullanım faktörü aynı zamanda baz istasyonu kapsama yarıçapı ile ilgilidir. Tekrar kullanım faktörü Denklem (7)' de gösterilen bağıntı ile hesap edilmektedir. [15]

$$\frac{d}{r} = \sqrt{3N_R} \quad (7)$$

$d$ : Tekrar kullanım için gerekli en kısa mesafe,  $r$ : Baz istasyonu kapsama yarıçapı

Bir baz istasyonu kapsama yarıçapını tespit edebilmek için telsizin aldığı en düşük sinyal seviyesinin baz istasyonundan ne kadar uzaklıkta olduğunu tespit etmek yeterli olacaktır. Bunun için Denklem (8)' deki bağıntı kullanılarak link bütçesi hesap edilmektedir.

$$R_x = T_x + G - (IL + L) \quad (8)$$

$R_x$ : Alıcıya ulaşan güç,  $T_x$ : Baz istasyonu çıkış gücü,  $G$ : Anten Kazancı,  $IL$ : Insertion Loss (girişim kaybı), toplam, kablo ve konektör kayıplarını ifade eder,  $L$ : Yol Kaybı

Çalışma yapılan sistemde en fazla girişime maruz kalan 2 no.lu baz istasyonu olduğu için link bütçesinde referans olarak bu baz istasyonu seçilmiştir. 2 no.lu baz istasyonunda;

$R_xA = -95$  dB,  $T_x + G - IL = 17$  dB olarak ayarlanmıştır. Denklem (8) üzerinden yol kaybı  $L = 112$  dB olarak bulunmuştur.

İzotropik antenlerden oluşan bir kapsama alanındaki LoS bölgelerinde yol kaybı hesap edilirken temel olarak Denklem (9)'daki serbest uzay kaybı formülü kullanılır [16].

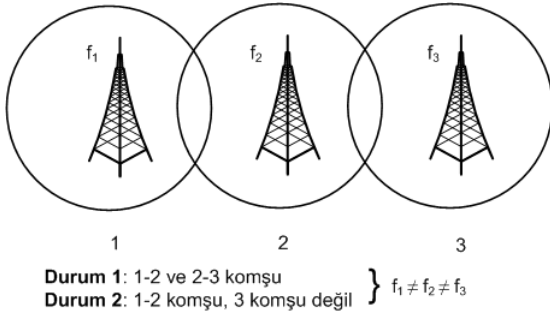


$$L = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (9)$$

f: MHz cinsinden verici frekansı, d: km cinsinden alıcı ile verici arasındaki mesafe,  $f = 420$  MHz ve  $L = 112$  dB için  $d = 22.9$  km olarak bulunmaktadır.

Buradaki d değeri Denklem 6'daki r değerine karşılık gelmektedir. Denklem 5'ten  $N_R$  değeri TETRA standartlarına göre 17.88 olarak bulunmaktadır.  $N_R$  ve r değerleri Denklem 6'daki yerlerine yazıldığı zaman  $d = 167.72$  km olarak hesap edilmektedir. Çalışma yapılan bölgede  $d = 167.22$  km mesafeye ulaşamadığı için frekans tekrarı yapılamamaktadır.

Görüş ufku çizgisinde olmayan baz istasyonları için Şekil 10'da gösterilen durumların sağlandığı baz istasyonları arasında da frekans tekrarı yapılamamaktadır. Bu durum sistemde tanımlı komşuluk ilişkilerinden kaynaklanmakta olup telsiz aynı frekansı farklı komşu hücrelerde gördüğü zaman kararsız bir durum yaşamaktadır.



Şekil 10. Görüş ufkunda olmayan baz istasyonları için frekans tekrarı yapılamayacak durumların gösterimi

### 3 Bulgular ve tartışma

Çalışma yapılan sistemde 11 adet baz istasyonu olup bunlardan 4 tanesi yer altı 7 tanesi yer üstü kapsamayı sağlamaktadır. Bu baz istasyonlarına 410-430 MHz bandında ve her biri arasında 25 kHz fark olan F1-F17 frekansları arasından 14 tane frekans tahsis edilmiştir. F2, F3 ve F12 frekansları üst kurum tarafından sistemin sahibi olan kuruma tahsis edilmediği için F2, F3 ve F12 frekansları planlamada kullanılamamaktadır.

Tablo 1. Sistemde tanımlı komşuluk ilişkileri

BTS No	Komşu BTS No
1	2, 3, 4
2	1, 3, 6, 7
3	1, 2, 4, 11
4	1, 3, 5
5	4, 11
6	2, 7
7	2, 6
8	2, 9, 10
9	8, 10
10	8, 9
11	1, 2, 3, 5

Başlık 3 ve Tablo 1'deki bilgiler ışığında frekans planı şu şekilde yapılmıştır:

- 1, 2, 3, 6, 8 ve 9 no.lu baz istasyonları LoS bölgesinde olduğu için bu baz istasyonlarına ait frekanslar birbirinden farklı olmalıdır.

- 9 no.lu baz istasyonu için yapılan trafik analizinde tek taşıyıcı ile hizmet verebileceği tespit edilmiştir. Bu sebeple bu baz istasyonuna tek frekans ataması yapılmıştır.
- 9 no.lu baz istasyonu sinyalinin Avrupa yakasına daha düşük değerde ulaşması girişim olan bölge sayısını azaltacaktır. Bu sebeple 9 no.lu baz istasyonuna F17 frekansı tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 8 no.lu baz istasyonu sinyalinin Avrupa yakasındaki kapsamayı etkilememesi için bu baz istasyonunda yönlü anten kullanılmıştır. Fakat kullanılan yönlü antenin ışın diyagramı Avrupa yakasına sinyalin geçmesine müsaade etmektedir. Bu durumun etkisini azaltmak için 9 no.lu baz istasyonu için tahsis edilen frekansa en az 50 kHz uzaklıktaki ve 9 no.lu baz istasyonuna ait frekanstan sonraki en yüksek frekans olan F13 - F15 frekanslarının tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 6 no.lu baz istasyonun 2 ve 7 no.lu baz istasyonları ile komşuluk ilişkisi mevcuttur. Bu baz istasyonu ayrıca 11 no.lu baz istasyonu ile handover yapmaktadır. Bu sebeple 6 no.lu baz istasyonu LoS bölgelerinde bulunan baz istasyonları ile 7 no.lu ve 11 no.lu baz istasyonlarından farklı frekanslara sahip olmalıdır. Diğer yandan 4 ile 6 numaralı baz istasyonu birbiri ile etkileşim halindedir. Şekil 9'da gösterilen Durum-2 gereği 5 ve 6 no.lu baz istasyonlarına ait frekanslar normalde birbirinden farklı olmalıdır. Fakat bu etkileşim sadece bir bölgede olduğu ve bu sorun telsizlerde yapılan konfigürasyonla aşılabildiği için 5 ve 6 no.lu baz istasyonlarına aynı frekans tahsis edilmesinde bir sorun olmayacağı öngörülmüştür.
- 6 no.lu baz istasyonu frekansı LoS bölgesindeki 2, 8, ve 9 no.lu baz istasyonlarına ait frekanslardan en az 50 kHz uzaklıkta olmalıdır. Bu sebeple 6 no.lu baz istasyonu için F5 - F7 frekans çiftinin tahsis edilmesi önerilmiştir.
- 4 no.lu baz istasyonunun 1, 3 ve 5 no.lu baz istasyonları ile komşuluk ilişkisi mevcuttur. Bu baz istasyonu ayrıca Denklem 9'da gösterilen Durum 2'deki koşulları sağladığından bu baz istasyonuna ait frekans 2, 6, 8, 9 no.lu baz istasyonlarına ait frekanslardan farklı olmalıdır. Ayrıca bu baz istasyonu arada komşuluk ilişkisi olmamasına rağmen 11 no.lu baz istasyonu ile Type-1 handover yapmaktadır. Dolayısıyla 4 ve 11 no.lu baz istasyonları frekansları da birbirinden farklı olmalıdır.
- 4 no.lu baz istasyonu 2 ve 5 no.lu baz istasyonları ile etkileşim halinde olduğu için 4 no.lu baz istasyonuna F4, F6 ve F10 frekanslarının tahsis edilmesi tavsiye edilmemektedir. Bu sebeple 4 no.lu baz istasyonuna F14 - F16 frekans çiftinin tahsis edilmesinin uygun olacağı öngörülmüştür.
- 7 no.lu baz istasyonunun 2 ve 6 no.lu baz istasyonları ile komşuluk ilişkisi mevcuttur. 6 no.lu baz istasyonu ile olan komşuluk ilişkisinden dolayı Şekil 9'da gösterilen Durum-2'deki koşulları yaşamaktadır. Ayrıca bu baz istasyonu sinyali sadece bir bölgede LoS bölgesine girmektedir. Bu sebeple bu baz istasyonuna



atanacak frekans diğer baz istasyonlarından farklı olmalıdır.

- 7 no.lu baz istasyonu 2, 3, 8 ve 9 no.lu baz istasyonları ile etkileşim halindedir. Bu sebeple bu baz istasyonu için tahsis edilecek frekans LoS bölgesindeki diğer baz istasyonlarına tahsis edilen frekanslara en az 50 kHz uzaklıkta olmalıdır. 7 no.lu baz istasyonu için F4 – F6 frekanslarının tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 10 no.lu baz istasyonu 7 no.lu baz istasyonu ile benzer koşulları sağladığı için 7 ve 10 no.lu baz istasyonlarına aynı frekansın tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 11 no.lu baz istasyonu 1, 2, 3 ve 5 no.lu baz istasyonları ile komşu olduğu için ve aynı zamanda Şekil 9'daki Durum-2'de belirtilen koşulları da sağladığı için bu baz istasyonuna ait frekans diğer baz istasyonlarına ait frekanslardan farklı olmalıdır.
- 11 no.lu baz istasyonu bulunduğu metro hattının özelliğinden dolayı bu baz istasyonu sinyalinin daha az zayıflaması istenilmektedir. Bu sebeple 11 no.lu baz istasyonuna F1 frekansının tahsis edilmesi tavsiye edilmektedir.
- 2 no.lu baz istasyonu hem Anadolu yakasında hem de Avrupa yakasında en fazla etkileşim içinde olan baz istasyonudur. Bu sebeple bu baz istasyonuna ait sinyalin biraz zayıflaması için yüksek frekans tahsisi gerekmektedir. LoS bölgesindeki diğer baz istasyonlarına tahsis edilen frekanslardan 50 kHz uzaklıktaki ilk frekans çifti olan F9 – F11 frekansları bu baz istasyonuna tahsis edilmesi önerilmektedir.
- LoS bölgesindeki baz istasyonu sinyalleri ile etkileşim içinde olan 1 ve 3 no.lu baz istasyonlarına bir frekans tahsisi yapılamamıştır. Bu baz istasyonlarına tahsis edilecek frekanslar ya ortak kanal girişimine ya da komşu kanal girişimine neden olmaktadır.

**Tablo 2.** Frekans Planı

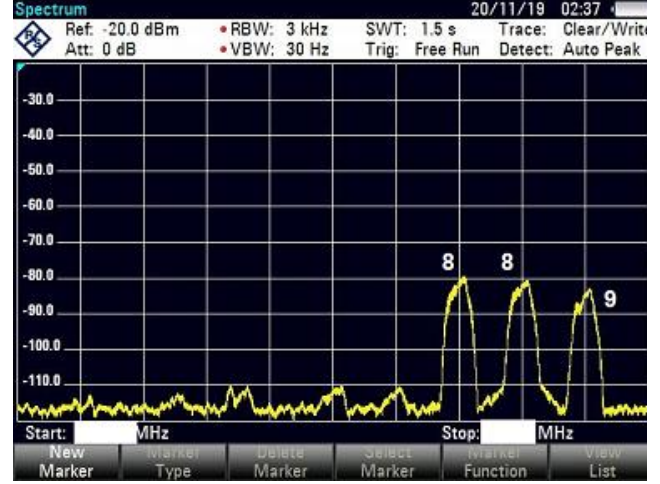
BTS No	Frekans No
1	-
2	F11, F9
3	-
4	F14, F16
5	F5, F7
6	F5, F7
7	F4, F6
8	F13, F15
9	F17
10	F4, F6
11	F1

Yapılan hesaplamalar neticesinde 410-430 MHz frekans bandı kullanan TETRA sisteminde görüş ufkunda haberleşme var ise ortak kanal girişiminin yaşanmaması için gerekli en kısa mesafe yaklaşık 167 km olarak belirlenmiştir. Görüş ufkunda olmayan baz istasyonları arasında frekans tekrarı yapabilmek için ise komşuluk ilişkilerinin göz önünde bulundurulması gerektiği tespit edilmiştir.

Komşu kanal girişimi için durdurma bandı başlama frekansı ile yayın yapılan merkez frekans arasındaki farkın önemli olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın 25 kHz altında

olduğu durumlarda ardışık iki frekans arasında 25 kHz koruma bandı atanması gerektiği görülmüştür.

Planlama öncesi ölçüm sonucu Şekil 6' da gösterilen 2 no'lu bölge için planlama sonrası aynı noktadan alınan ölçüm sonuçları Şekil 11' de gösterilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarına göre 8 ve 9 no.lu baz istasyonları arasında yaşanan girişim planlama sonrasında ortadan kalkmıştır.



**Şekil 11.** Planlama sonrası alınan ölçüm sonuçları

Çalışma yapılan sistemde 167 km'lik mesafe yakalanmadığı için daha çok komşuluk ilişkileri ve kullanılan filtre çıkış grafiği göz önüne alınarak frekans planı yapmak istenilmiştir. Mevcut frekanslarla yapılan planlama neticesinde 1 ve 3 no.lu olmak üzere 2 adet baz istasyonuna frekans tahsisi yapılamamıştır. Bu baz istasyonlarına tahsis edilecek frekanslar ortak kanal ya da ardışık kanal girişimine neden olacaktır. Bu sebeple çalışma yapılan sistemde RF optimizasyonu yapılarak frekans tahsisi yapan üst kurumdan yeni frekansların tahsis edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

#### 4 Sonuçlar

Yapılan çalışma ile sayısal telsiz sisteminde komşu kanal girişimini engellemek için koruma bandı ataması yaparken frekans kaynağının kısıtlı olduğu göz önüne alınması gerektiği görülmüştür. Bu sebeple sistemin kabul ettiği en yüksek bit hata oranının (BER, Bit Error Rate) aşılmadığı komşu kanal girişiminin bir sorun teşkil etmeyeceği tespit edilmiştir.

Ortak kanal girişiminde frekans tekrarı için gereken baz istasyonları arası en kısa mesafe olmadığı durumda baz istasyonları sinyallerinin LoS bölgesinde olmaması gerektiği tespit edilmiş fakat sayısal telsiz sisteminde bu koşulun yetersiz olduğu görülmüştür. Bu sorunun aşılması için ise sistemdeki komşuluk ilişkilerinin göz önüne alınması gerektiği tespit edilmiştir.

#### Teşekkür

Bu makale konusunda kendimi geliştirmem konusunda bana yol açan değerli ilk şefim Ender Divriklioğlu' na, makalede bahsi geçen çalışmayı yapabilmem için ölümlükteki engelleri kaldıran değerli müdürüm Ahmet Selami Söğüt' e, yüksek lisans programına başlamama vesile olan değerli

hocam Oğuz Bayat' a ve yüksek lisans programını tamamlama konusunda bana yardımcı olarak akademik yol açan değerli hocalarım Çağatay Aydın ve Doğu Çağdaş Atilla' ya teşekkür ederim.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** % 7

#### Kaynaklar

- [1] A. M. C. A. Koster, Frequency Assignment: Models and Algorithms. PhD Thesis, Maastricht University, Maastricht, Netherlands, 1999.
- [2] H. Thue. Frequency planning as a set partitioning problem. European Journal of Operational Research, 6(1), 29-37, 1981. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90325-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90325-8).
- [3] A. Eisenblatter, M. Grötschel and A. M. C. A. Koster, Frequency Planning and Ramifications of Coloring. Discussiones Mathematicae Graph Theory, 22(1), 51-88, 2002. <https://doi.org/10.7151/dmgt.1158>.
- [4] R.C. Santiago, A .Raymond and V. Lyanders, Enhanced Efficiency and Frequency Assignment by Optimizing the Base Station Location in a Mobile Radio Network. Springer, 14(4), 531-541, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11276-006-0735-5>.
- [5] A. Annunziato and D. Sorbara, TETRA radio performance evaluated via the software package. Mobile Networks and Applications, 5(1), 17-26, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1019123620969>.
- [6] EN 300 392-2 V3.8.1, Terrestrial Trunked Radio (TETRA) - Voice plus Data (V+D) Part 2: Air Interface (AI). European Telecommunications Standards Institute, Sophia Antipolis, 2016.
- [7] EN 300 392-2 V2.3.2, Terrestrial Trunked Radio (TETRA) - Voice plus Data (V+D) Part 2: Air Interface (AI). European Telecommunications Standards Institute, Sophia Antipolis, 2001.
- [8] W. Webb, The Complete Wireless Communications Professional: A Guide for Engineers and Managers. in: W. Webb (Eds.), The Basics of Mobile Radio, Artech House, pp. 34-37, Norwood, 1999.
- [9] P. Stavroulakis, Terrestrial Trunked Radio - TETRA A Global Security Tool. in: P. Stavroulakis (Eds.), TETRA Providing an Acceptable Security, Springer, pp. 52-55, Berlin, 2007.
- [10] I. Stojmenovic, Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing. in: I. Stojmenovic (Eds.), Interference in Cellular System, Wiley Interscience Publication, pp. 52-53, Newyork, 2002.
- [11] J. Walrand and P. Varaiya, High-performance Communication Networks. in: J. Walrand and P. Varaiya (Eds.), The Wireless Channel, Morgan Kaufmann, pp. 305-361, California, 2000
- [12] Y. Li, X. Sha, L. Ye and X. Fang, Downlink Resource Sharing for D2D Communications in a Filtered OFDM System. 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1-6, Nanjing, China, 15-18 May 2016.
- [13] J. Dunlop, D. Girma and J. Invine, Digital Mobile Communications and TETRA System. in: J. Dunlop, D. Girma and J. Invine (Eds.), Interference to Other System, John Wiley&Sons, pp. 249, West Sussex, 1999.
- [14] H. Hammuda, Cellular Mobile Radio System. in: H. Hammuda (Eds.), Co-Channel Interference Model, John Wiley&Sons, pp. 47-66, West Sussex, 1997.
- [15] Spectrum Efficiency of CDMA-PAMR and Other Wideband Systems for PMR/PAMR. Electronic Communications Committee, Granada, Spain, ECC Report 042, February 2004.
- [16] S. Winder and J. Carr, Newnes Radio and RF Engineering Pocket Book. in: S. Winder (Eds.), Propagation of radio waves, Newnes, pp. 1-24, Woburn, 2002.





## Sürdürülebilir işgücü çizelgeleme ve rotalama probleminin değişken komşu arama algoritmasıyla çözümü: Samsun örneği

### The Sustainable workforce scheduling and routing problem with variable neighbourhood search algorithm: The case of Samsun

Mehmet Erdem<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada sürdürülebilir işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi (S-İÇRP) ele alınmıştır. Problemde farklı yetkinlik seviyesine sahip çalışanlardan takımlar oluşturularak farklı ilçelerde bulunan müşterilere önceden belirlenmiş zaman dilimi içerisinde hizmet verilmektedir. Problem için tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş olup model araç rotalama, işgücü çizelgeleme, araç şarj durumu takibi ve şarj istasyonu ziyareti gibi kararlar da gözetilmiştir. Ayrıca farklı amaç fonksiyonları göz önüne alınarak toplam mesafenin yanı sıra, araç maliyeti de dikkate alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar bize elektrikli araçların bakım hizmeti sağlayan firmalarda günlük kullanılabilirliğini göstermiştir. Ayrıca geliştirilen değişken komşu arama (DKA) algoritmasının performansı kesin çözüm yöntemiyle karşılaştırılmış ve sonuçlar önerilen yöntemin iyi çözüm bulmadaki etkinliğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Elektrikli araçlar, İşgücü çizelgeleme, Matematiksel programlama.

#### 1 Giriş

Ulaşım sektörünün kalkınmaya, büyümeye ve istihdama olan katkısı yadsınamaz bir gerçektir [1-3], fakat sektörün negatif çevresel etkileri konusunda da farkındalık artmaktadır [4]. Araştırmacılar iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirmek ve kısıtlı miktardaki fosil yakıt bağımlılığını azaltmak için farklı öneriler getirmektedir. Bu sebepten dolayı kural koyucular bu sorunların çözümü için hedefler belirlemektedir. Ulaşım sektörü toplam sera gazı miktarının %20'sini ürettiği bilinmektedir [5]. Bu sebepten ötürü, Avrupa Birliği, sera gazının 2020 yılına kadar %20, 2030 yılına kadar %40 azaltmayı hedeflemektedir [6]. Şehirlerde kullanılan içten yanmalı motorlu araçların kullanımıyla ilgili tartışmalar konunun önemini de vurgulamaktadır [7]. Elektrikli araçlar (EA) yukarıda bahsi geçen problemlere çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. UPS, DHL, FedEx, General Electric ve Coca-Cola gibi firmalar lojistik operasyonlarında elektrikli lojistik filo kullanılmaya çoktan başlamıştır [8, 9]. Bu araçların sıfır emisyonu sahip olması, gürültü seviyesinin düşük olması, içten yanmalı motora göre daha az bakım maliyeti gerektirmesi vb. avantajlarından

#### Abstract

This paper addresses sustainable workforce scheduling and routing problem (WSRP), in which technicians with different levels of competence are paired into teams to serve customers in different geographic regions-districts within predetermined time windows. We formulate the WSRP as a mixed integer linear programming formulation that covers the decisions such as scheduling, routing, state of charge, and visiting of the charging stations. Furthermore, we developed different objective functions minimizing not only total travelled distance, but also the number of electrical vehicles employed. The performance of the proposed heuristic is tested by using real-world data. In addition, the developed variable neighbourhood search algorithm is compared with the exact solution method and the computational results indicates that the proposed heuristic can yield high quality of solutions.

**Keywords:** Electric vehicles, Workforce scheduling, Mathematical programming.

ötürü sürdürülebilirlik açısından büyük bir fırsat olarak görülmektedir.

Bu çalışmada tek periyotlu sürdürülebilir işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi (S-İÇRP) ele alınmıştır. Problemde bakım hizmeti sağlayıcısından farklı ilçelerde konumlanmış müşteriler, bir dizi düzeltici ve önleyici bakım, arıza tespiti ve yedek parça teslimatı gibi hizmet talep etmektedir. Hizmet sağlayıcısı firma bu hizmetleri farklı kalifiye teknisyenlerden oluşturduğu takımlarla müşterilerin bulunduğu lokasyonlarda sunmaktadır. Takımlar müşterilere ulaşmada mevcut literatürün aksine klasik içten yanmalı motorlu araçları değil çevreci elektrikli araçları kullanmaktadır. Ayrıca bu araçlara ait maliyetler de göz önüne alınmıştır. Yapılan çalışmanın literatüre katkıları şunlardır:

- Elektrikli araçlar gözetilerek tek periyotlu sürdürülebilir işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi (S-İÇRP) modellenmiş olup mevcut literatürle ilişkisi tanımlanmıştır.
- Gerçek hayat verisi kullanarak deneysel hesaplamalar yapılmış olup ayrıca önerilen çözüm yönteminin performansı da değerlendirilmiştir.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmet.erdem@omu.edu.tr (M.Erdem)  
Geliş / Received: 11.03.2021 Kabul / Accepted: 11.01.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022  
doi: 10.28948/ngmuh.895487

• Sezgisel yöntemin iyi sonuçlar ürettiği de gözlemlenmiştir.

Çalışmanın bu aşamadan sonraki takip eden kısımları sırasıyla şu şekilde düzenlenmiştir. İlk önce literatür incelenecek, sonraki kısımda probleminin tanımı ve formülasyonu verilecek, aynı kısımda önerilen sezgisel çözüm yöntemi sunulacak, dördüncü kısımda deneysel hesaplama sonuçları analiz edilecek ve son kısımda ise elde edilen sonuçlardan bahsedilecektir.

Personel çizelgeleme problemi birçok araştırmacı tarafından farklı üretim ve hizmet sektörlerine uygulanmıştır [10-12]. Problemin karmaşık yapısı gereği uygun personelin seçimi ve atanması, izin planlama, vardiya yönetimi vb. farklı aşamaların göz önüne alınması gerekmektedir. Problem ayrıca talep modelleme, izin günü planlama, vardiya çizelgeleme, iş hattı yapımı, görev atama ve personel atama olarak sınıflandırılmaktadır [11]. Bu çalışmada ele alınan problem personel atama sınıfına dâhil edilebilir.

Castillo-Salazar, vd. [13] İÇRP hakkında literatür araştırması yaparak farklı alanlardaki çalışmalarını sınıflandırmış ve genel karakteristiklerini ortaya koymuşlardır. Evde bakım/sağlık hizmetleri, teknisyen çizelgeleme, güvenlik personeli rotalama ve çizelgeleme ve iş gücü atama problemlerini sınıflamışlar ve incelemişlerdir. Cordeau, vd. [14] teknisyen ve iş çizelgeleme problemini göz önüne almışlardır. Problemde belirli görevler için birden fazla çalışanın yetkinlik seviyesine göre atanması göz önüne alınmıştır. Ele alınan tek periyotlu problemde amaç tüm işlerin tamamlanma zamanını minimize etmektir. İşlerin gereksinimi, işlere ilişkin öncelik sıralamaları, teknisyen uygunluğu ve çalışma saatine ilişkin kısıtlar modelde dikkate alınmıştır. Problemde rotalama kararı ise göz ardı edilmiştir. Kovacs, vd. [15] teknisyen ve iş çizelgeleme probleminde rotalama kararını dikkate alarak teknisyen rotalama ve çizelgeleme problemini tanımlamıştır. Cordeau, vd. [14]'nin ele aldığı probleme benzer şekilde bakım görevleri için ekiplerin oluşturulması için farklı beceriye sahip teknisyenler modele dâhil edilmiştir. Problemde amaç talep edilen hizmetleri belirli zaman penceresi içinde yerine getirmek ve seyahat masraflarını en aza indirmektir. Problemde takımlar farklı boyutlara sahip olabildiği gibi işlerde yapılmaz. Her iki çalışmada uyarlanabilir büyük komşu arama (UBKA) ile çözüm yöntemi geliştirilmiştir.

Lim, vd. [16] zaman pencereci işgücü atama problemi ele almışlardır. Çalışma bir limanda istihdam edilen çalışanların bir dizi farklı görevler için atanmasını konu almaktadır. Modelin amacı atanmış çalışan sayısının, toplam mesafenin, bekleme zamanının minimize edilmesinin yanı sıra yapılan işlerin sayısının artırılmasıdır. Çalışanların benzer tecrübe seviyesine sahip olduğu kabul edilmiştir. Problemin çözümü için tabu arama ve tavlama benzetiminden oluşan bir sezgiselin yanı sıra yerel arama tabanlı bir algoritma geliştirilmiştir. Li, vd. [17] benzer bir problem üzerinde çalışmış ve takım oluşturma kısıtı eklemiştir. Problemin amacı toplam seyahat zamanının ve toplam çalışan sayısının minimize edilmesidir. Problem için çözüm kurucu sezgisel önerilmiş ve tavlama benzetimi ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Havalimanı yer hizmetleri görevlerinde benzer

iş gücü atama problemi için Dohn, vd. [18] tam sayılı programlama modeli sunmuşlardır. Dal-Ücret algoritmasına dayalı çözüm yöntemi ile problem çözülmüştür. Xu ve Chiu [19] telekomünikasyon sektöründeki bir servis sağlayıcı için benzer bir problemi ele almışlardır. Geliştirilen modelde amaç teknisyenlerin yetkinlik seviyelerini maksimize ederek kalifiye personelin atanma olasılığını artırmaktır. Pillac, vd. [20] benzer bir problemi ele alarak teknisyenin yetkinliğinin yanı sıra kullandığı alet ve elindeki yedek parçaları da dikkate almışlardır. Teknisyenlerden takım oluşturma ise yine göz ardı edilmiştir. Problemin çözümünde paralel UBKA algoritmasını kullanmışlardır. Zamorano ve Stolletz [21] periyodik teknisyen rotalama ve çizelgeleme problemini ele alarak dal-ücret algoritmasını problemin çözümünde uygulamışlardır. Ayrıca, yöntemin performansı gerçek hayat verisi ile test edilmiştir. Erdem [22] benzer periyodik teknisyen rotalama ve çizelgeleme problemini ele alarak çalışanların yasal dinlenme sürelerini de gözlemlemiştir. Ayrıca önerilen modelde çalışanların kullandığı elektrikli araçlar için şarj istasyonu yeri seçimi dikkate alınmıştır. Zamorano ve Stolletz [21] tarafından çözülen ufak boyutlu problemler yerine çalışmada daha büyük boyutlu örnekler çözülmüştür.

Klasik araç rotalama probleminde (ARP) kullanılan araçlar içten yanmalı motora sahiptir. Erdoğan ve Miller-Hooks [23] mevcut teknoloji yerine çevreci/yeşil motorlu araçları bu problemde ilk olarak kullanmışlardır. Alternatif yakıt kullanan araçlar yerine elektrikli araçlar kullanarak, Schneider, vd. [24] elektrikli zaman pencereci ARP (E-ZPARP)'yi geliştirmişlerdir. Bu problemde araçların enerji ikmali için harcanan uzun süre ve şarj istasyonu önemli ve problemi karmaşıklaştıran sorunlardır. Bundan dolayı müşteri lokasyonunda araçların şarj olması da bazı çalışmalara dâhil edilmiştir [25]. Elektrikli araçlar, şarj için önemli bir süreyi boşa geçirmektedirler bu sebepten ötürü boş bataryanın dolu batarya ile değiştirilmesini dikkate alan çalışmalar şarj süresini sabit kabul etmişlerdir [23, 25, 26]. Benzer şekilde ful şarj politikası izleyen diğer çalışmalar ise araçların istasyondan %100 şarj ile hareket ettiğini varsaymıştır [24, 27-29]. Bu durum pek gerçekçi değildir çünkü kısıtlı zamanın etkin kullanımını etkilemektedir. Bu çalışmalardan farklı olarak şarj süresinin negatif etkisini azaltmak için kısmi şarj çoğu çalışmada dikkate alınıp, modele karar değişkeni olarak eklenmiştir [8, 30-32]. Elektrikli ticari araçların mal dağıtımı ve pil karakteristikleri hakkında kapsamlı bilgi için Pelletier, vd. [33] ve Pelletier, vd. [34]'nin çalışmaları incelenebilir. E-ZPARP çözümünde genelde sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Bunlar kısaca bahsetmek gerekirse: tabu arama-değişken komşu arama algoritmalarından oluşan hibrit bir sezgisel [24], UBKA [29, 31, 35] ve tavlama benzetimi [30]. Ayrıca, Desaulniers, vd. [28] farklı E-ARP problemleri için bir dal-ücret-kes yöntemiyle kesin çözüm yaklaşımı sunmuşlardır.

Sonuç olarak ele alınan problemde bir dizi çalışandan takım oluşturulması, takımların işlere belirlenen yeterlilik seviyesi gözetilerek atanması, takımların kullandığı çevreci elektrikli araçların rotasının belirlenmesi, bu araçlara ait şarj durumunun takibi ve şarj gerekirse nerede ve ne zaman şarj olacağı göz önüne alınan diğer kararlar arasındadır. Ayrıca elektrikli araçların kullanımıyla avantajlar bulunmakla



beraber kısıtlı menzili, şarj olma süresinin uzunluğu ve şarj istasyonu alt yapısının mevcudiyeti vb. konular da planlamada dikkate alınması gerekmektedir. Yapılan çalışmada matematiksel olarak tanımlanan problem için karma tam sayılı lineer programlama formülasyonu geliştirilmiştir. Ayrıca, çözüm için değişken komşu arama (DKA) sezgiseli geliştirilerek makul zamanda etkin çözüm vermesi sağlanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

Sürdürülebilir işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi (S-İÇRP) Şekil 1'deki gibi örneklendirilmiştir. On müşteri, üç istasyon ve iki depoyu içeren örnekte, yüzdelik değerler araçların ilgili düğüme vardığında ve ayrıldığında şarj seviyesine karşılık gelmektedir. Müşteri istekleri önceden belirli olup günün belirli bir zaman diliminde gerçekleşmesi gerekmektedir. Koyu renkteki köşeli parantez içindeki rakamlar ilgili müşterinin zaman penceresini ve parantez içindeki değer ise işin süresini ifade etmektedir. Ayrıca her müşteri isteği en fazla bir takım tarafından yerine getirilmesi gerekmektedir ve tüm işler ifa edilmelidir. Her bir takım belirlenen sayıda teknisyenden oluşmaktadır ve takımlar talep edilen işleri yapmak için tek tip-homojen elektrikli araç kullanılmaktadır. Farklı bölgelerde bulunan depolardan hareket eden takımlar yine tanımlanan mesai saati içinde hizmet verebilmektedir. Takım 1 müşteri 10'a uğradıktan sonra depoya dönerken şarj istasyonuna uğramış, takımın kullandığı araç istasyona %5 şarj seviyesi ile girip %80 şarj seviyesi ile çıkmıştır. Takım 3 şarj istasyonu 3'e iki kere uğramıştır. Takım 2 ise şarj istasyonuna uğramaya gerek kalmadan görevini tamamlamıştır. Ayrıca şarj istasyonu 2'ye hiçbir takım uğramamıştır. Servis zamanı, seyahat mesafesi ve yapılması gereken işin gerektirdiği yetkinlik seviyesi önceden bilinmektedir. Teknisyenlerin de sahip oldukları (hidrolik, mekanik, elektrik vb.) birtakım kalifiye eleman özellikleri mevcuttur. Başka bir deyişle takımın kalifiye seviyesi, teknisyen kalifiye seviyesinin birleşiminden oluşmaktadır. Problemin matematiksel modeli için gösterimi ve formülasyonu sırasıyla verilmiştir.

Bu problem iş kümesi  $B$ , şarj istasyonu kümesi  $F$ , iki farklı depoya ait düğümlerden oluşmaktadır. Ayrıca, küme  $N$ , müşteri kümesi  $B$  ve birden fazla şarj istasyonuna izin veren  $F$  olarak tanımlanmaktadır. Başlangıç ve bitiş deposu  $0_k$  ve  $n_k$  ile gösterilmektedir. Dolayısıyla  $N_{0_k}$  ( $N_{n_k}$ ) başlangıç ve bitiş depolarını içeren tüm düğümleri içerirken,  $N_{0_k, n_k}$  kümesi  $N \cup \{0_k, n_k\}$  kümesini ifade etmektedir. Benzer gösterim  $B$  ve  $F$  içinde kullanılmıştır. Problem yönlü ağ yapısıyla ifade edilebilir  $G = (\cup_{k \in T} N_{0_k, n_k}, A)$  ve bu gösterimde  $A = \{(i, j) | i, j \in \cup_{k \in T} N_{0_k, n_k}, i \neq j\}$  yönlü ayrıt kümesini ifade etmektedir. Ayrıca, problemde  $m, n \in M$  teknisyen çiftleri bir takıma  $k \in T$  atanarak talep edilen bakım görevlerini yerine getirmek için gönderilir. Takımlar bu işlere ulaşmada kullandıkları elektrikli araçlar homojendir. Buna ek olarak, teknisyenlerin ve işlerin yetkinlikleri ve bu yetkinliklerin seviyeleri tanımlanmıştır. Yetkinlikler  $q \in Q$  kümesi, yetkinlik seviyesi ise  $l \in L$  ile tanımlanmıştır.

Rota karar değişkeni  $x_{ijk}$   $k$  takımı  $i$ . düğümden  $j$ . düğüme giderse 1 değerini, diğer durumda 0 değerini almaktadır  $k \in T, i, j \in N_{0_k, n_k}, i \neq j$ . Her bir düğümün zaman penceresi  $[\alpha_i, \beta_i]$  ile tanımlanmış olup, işlerin tamamlanması için gereken süre ise  $d_i$  ile tanımlanmaktadır  $i \in B$ . Aracın düğümler arası seyahat süresi  $t_{ij}$ 'dir  $i, j \in N_{0_k, n_k}, i \neq j$ . Çalışanlara ilişkin mesai saatleri ise  $[a, \beta]$  ile tanımlanmaktadır. Çizelge/zaman karar değişkeni  $\tau_k$ ,  $k$  takımının  $i$ . düğüme varış zamanını ifade etmektedir  $k \in T, i \in N_{n_k}$ .

Takımların kullanmış olduğu elektrikli araçların azami enerji kapasitesi  $Y$  ile tanımlanmaktadır ve şarj karar değişkeni  $y_{ik}$   $k$  takımının  $i$ . düğümündeki enerji seviyesini ifade etmektedir  $k \in T, i \in N_{n_k}$ . Ayrıca,  $k$  takımının  $i$ . şarj istasyonundan ayrıldığında enerji seviyesi  $h_{ik}$  ve  $k$  takımının  $i$ . şarj istasyonundaki şarj süresi  $g_{ik}$  ile gösterilmektedir. Araçların tükettiği birim başına enerji ise  $r$  ile tanımlanmaktadır. Bununla beraber  $\Delta$  parametresi aracın birim zamanda yeniden şarj olmasını miktarını ifade etmektedir (bkz. Tablo 1).

### 2.1 Amaçlar

Ele alınan problem farklı planlama perspektifleri içerebilir, bu sebepten dolayı farklı amaç fonksiyonları kullanılabilir. Literatürde EARP problemleri genelde toplam mesafenin minimizasyonunu dikkate almaktadır. EARP'den farklı olarak şarj istasyonu konum belirleme üzerine yapılan çalışmalarda, amaç işletme maliyeti, araç ve şarj istasyonu yatırım maliyetlerinden oluşmaktadır. Birinci Denklem (1)'de verilen amaç fonksiyonu kat edilen mesafenin maliyetini ifade etmektedir. İkinci Denklem (2)'de ise amaç mesafeye ilişkin maliyetle beraber takımların kullandığı aracın günlük maliyetini teşkil etmektedir. Bu amaçla beraber en az sayıda araçla işlerin yapılması da istenmektedir.

$$\text{Min. } \Theta_1 \sum_{k \in T} \sum_{i \in N_{0_k}} \sum_{j \in N_{n_k}} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

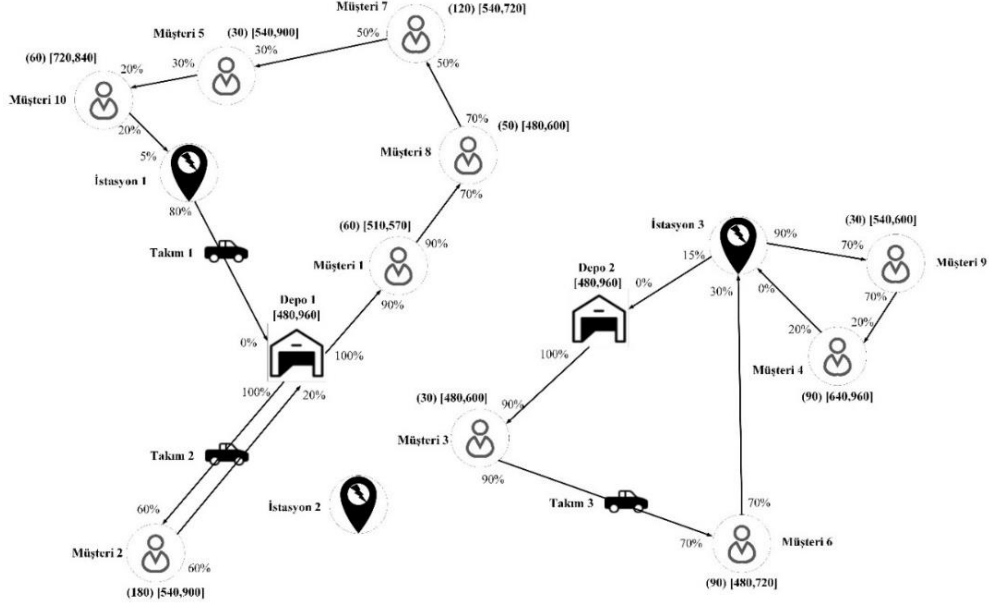
$$\text{Min. } \Theta_1 \sum_{k \in T} \sum_{i \in N_{0_k}} \sum_{j \in N_{n_k}} c_{ij} x_{ijk} + \Theta_2 \sum_{k \in T} \sum_{j \in N} x_{0_k j k} \quad (2)$$

### 2.2 Kısıtlar

Modelin kısıtlarından bu bölümde bahsedilecektir. 3 ve 4. kısıt tüm işlerin bir takıma atanmasını sağlamaktadır. 5. kısıt şarj istasyonu kullandığı takdirde göz önüne alınacaktır. Araçlar gerek duymadığı durumda şarj istasyonlarına uğramayacaktır. Araçların rotaları ait oldukları depolardan başlayıp ait oldukları depolarda bitmelidir (6-7 kısıt). 8. kısıt akış korunumu için tanımlanmıştır. Zaman kısıtları (9-11) ile göz önüne alınmıştır. İşlerin belirlenen zaman penceresi içinde yapılmasını ve çalışanların mesai saatleri (10) ile sağlanmıştır. 10. kısıtta herhangi bir işin başlama zamanı, bir önceki işin işlem süresi ve bir önceki düğümden seyahat süresi dikkate alınarak hesaplanmaktadır. 11. kısıt şarj



istasyonunu ve şarj süresini dikkate almaktadır. 10. kısıtın 11. kısıttan farkı, bir önceki düğümün şarj istasyonu olması ve şarj süresinin dikkate alınmasıdır.



Şekil 1. Problem örneği

Tablo 1. Notasyon (Notation)

Kümeler	
$B$	İş kümesi
$F$	Şarj istasyonları kümesi
$F'$	Kukla şarj istasyonları kümesi
$N$	$N = B \cup F' \cup F$ İş ve kukla istasyonları içeren küme
$N_{0_k}$	$N_{0_k} = N \cup \{0_k\}$
$N_{n_k}$	$N_{n_k} = N \cup \{n_k\}$
$N_{0_k, n_k}$	$N_{0_k, n_k} = N \cup \{0_k, n_k\}$
$T$	Takım kümesi
$M$	Teknisyen kümesi
$Q$	Teknisyen özellikleri kümesi
$L$	Yetkinlik seviyesi kümesi
Parametreler	
$c_{ij}$	$i$ . düğümünden $j$ . düğüme seyahat mesafesi
$t_{ij}$	$i$ . düğümünden $j$ . düğüme seyahat süresi
$[\alpha_i, \beta_i]$	$i$ işinin zaman penceresi
$d_i$	$i$ işinin hizmet süresi
$[\alpha, \beta]$	Teknisyenler için zaman penceresi
$\rho$	Takım içindeki teknisyen sayısı
$\mu_{mq}$	Eğer $i$ işi $l$ seviyesinde $q$ yetkinliği gerektirirse 1, diğer durumda 0
$\sigma_{mq}$	Eğer $m$ teknisyeni $l$ seviyesinde $q$ yetkinliğine sahip ise 1, diğer durumda 0
$r$	Mesafe başına enerji tüketimi
$\Delta$	Enerji birimi başına şarj süresi
$Y$	Azami enerji kapasitesi
$\Theta_1$	Kat edilen mesafe başına maliyet
$\Theta_2$	Kullanılan araç başına maliyet
Karar değişkenleri	
$x_{ijk}$	Eğer $k$ takımı $i$ işinden $j$ işine giderse 1, diğer durumda 0
$w_{ik}$	Eğer $k$ takımı $i$ işine atanırsa 1, diğer durumda 0
$z_{mk}$	Eğer $m$ teknisyeni $k$ takımına atanırsa 1, diğer durumda 0
$y_{ik}$	$k$ takımının $i$ düğümündeki enerji seviyesi
$h_{ik}$	$k$ takımının $i$ . şarj istasyonundan ayrılırken ki enerji seviyesi
$\tau_{ik}$	$k$ takımının $i$ işine başlama zamanı

$g_{ik}$

$k$  takımının  $i$ . şarj istasyonundaki şarj süresi

Şarj kısıtları (12-15) ile göz önüne alınmıştır. Araçların herhangi bir düğümdeki enerji seviyesi, enerji tüketimi kısıt (12-13) ile takip edilmektedir. Araçlar şarj istasyonundan ayrılırken şarj seviyeleri batarya kapasitesinden küçük istasyona vardığındaki seviyeden büyük olması için kısıt (14) kullanılmaktadır. Araçların şarj istasyonundaki şarj süresi kısıt (15) ile hesaplanmaktadır. Teknisyenlerin en fazla bir takıma atanması gerektiği kısıt (16) ile tanımlanmaktadır. Her takımda olması gereken teknisyen sayısı ise kısıt (17) ile sağlanmaktadır. İşin gerektirdiği yeterlilik seviyesi ve işe atanan takımdaki teknisyenler beceri birleşimi kısıt (18) ile dikkate alınmaktadır. Başka bir deyişle, takımların işin gereksinimini yerine getirebilecek teknisyenlerden oluşmasını sağlamaktadır. Son olarak kısıt (19-20) sırasıyla ikili ve pozitif değişkenlerin kümesini tanımlamaktadır.

$$\sum_{k \in T} w_{ik} = 1 \quad \forall i \in B \cup \{0_k, n_k\} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_{n_k}, i \neq j} x_{ijk} = w_{ik} \quad \forall i \in B \cup \{0_k, n_k\}, \forall k \in T \quad (4)$$

$$\sum_{k \in T} \sum_{j \in N_{n_k}, i \neq j} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in F' \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N_{n_k}, i \neq j} x_{0_k, jk} = 1 \quad \forall k \in T \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_{0_k}, i \neq j} x_{in_k, k} = 1 \quad \forall k \in T \quad (7)$$

$$\sum_{j \in N_{n_k}, i \neq j} x_{jik} - \sum_{i \in N_{0_k}, i \neq j} x_{ijk} = 0 \quad \forall k \in T, \forall j \in N \quad (8)$$

$$\alpha_j \leq \tau_{jk} \leq \beta_j \quad \forall k \in T, \forall j \in N_{0_k, n_k} \quad (9)$$

$$\tau_{ik} + (t_{ij} + d_i)x_{ijk} - \beta_{0_k}(1 - x_{ijk}) \leq \tau_{jk} \quad \forall k \in T, \forall i \in B_{0_k}, \forall j \in N_{n_k}, i \neq j \quad (10)$$

$$\tau_{ik} + (t_{ij} + g_{ik})x_{ijk} - (\beta_{0_k} + \Delta Y)(1 - x_{ijk}) \leq \tau_{jk} \quad \forall k \in T, \forall i \in F', \forall j \in N_{n_k}, i \neq j \quad (11)$$

$$y_{jk} \leq y_{ik} - (rd_{ij})x_{ijk} - Y(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in T, \forall i \in B, \forall j \in N_{n_k}, i \neq j \quad (12)$$

$$y_{jk} \leq h_{ik} - (rd_{ij})x_{ijk} - Y(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in T, \forall i \in F'_{0_k}, \forall j \in N_{n_k}, i \neq j \quad (13)$$

$$y_{jk} \leq h_{ik} \leq Y \quad \forall k \in T, \forall i \in F'_{0_k} \quad (14)$$

$$g_{ik} \geq \Delta(h_{ik} - y_{ik}) \leq Y \quad \forall k \in T, \forall i \in F' \quad (15)$$

$$\sum_{k \in T} z_{mk} \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (16)$$

$$\sum_{m \in M} z_{mk} = \rho \quad \forall k \in T \quad (17)$$

$$\mu_{iql} w_{ik} \leq \sum_{m \in M} \sigma_{mql} z_{mk} \quad \forall k \in T, \forall i \in B, \forall q \in Q, \forall l \in L \quad (18)$$

$$x_{ijk}, w_{ik}, z_{mk} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in T, \forall m \in M, \forall i \in N_{0_k}, \forall j \in N_{n_k}, i \neq j \quad (19)$$

$$\tau_{ik}, y_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in T, \forall i \in N_{n_k} \quad (20)$$

### 2.3 Değişken Komşu Arama Algoritması (Variable Neighbourhood Search Algorithm)

Değişken Komşu Arama (DKA), Mladenović ve Hansen [36] tarafından yerel arama algoritması olarak önerilen ve arama uzayındaki yerel tuzaklardan kurtulmak için kullanılan meta-sezgisel bir yöntemdir. Komşuluk yapısının sistematik bir yaklaşımla değişimi DKA algoritmasının temelini teşkil etmektedir. İlk uygulamaları kombinatoriyal optimizasyon problemleri olarak hedeflense de tam sayılı ve lineer olmayan programlamaya da uygulanmıştır. Konum teorisi, kümeleme analizi, çizelgeleme, araç rotalama, ağ tasarımı, parti büyüklüğü belirleme, yapay zekâ, mühendislik, güvenilirlik, vb. alanlarda başarılı uygulamaları bulunmaktadır [37]. DKA temel olarak 3 basit gözleme dayanmaktadır.

- Yerel en iyi çözüm diğer komşuluk yapılarına göre yerel bir en iyi çözüm olmak zorunda değildir.
- Global en iyi çözüm tüm olası komşuluk yapılarına göre bir yerel en iyi çözümdür.
- Birçok problem için, bir veya birkaç komşuluk yapısına göre yerel en iyi çözümler göreceli olarak birbirine benzerdir.

DKA yöntemi komşuluk yapısının deterministik ve stokastik değişimini birleştirir. Deterministik kısımdan kasıt yerel aramadır. Herhangi bir başlangıç çözümü kullanılarak, mevcut çözümden tanımlanan komşuluk yapısı ile daha iyi çözüme ulaşmak hedeflenmektedir. Amaç fonksiyonun iyileşmediği durumda yerel arama sezgisel durur. Stokastik kısım ise herhangi bir komşuluk yapısı kullanılarak yerel minimumlarda sıkışan çözümün bu noktalarda takılmasını önlemek amacıyla kullanılan prosedüre karşılık gelir. Ayrıca, bu kısım mevcut komşuluk yapısı kullanılarak bir noktanın rassal olarak seçimiyle de ifade edilir [38]. DKA algoritmasının akış diyagramı Ek A'da verilmiştir.

DKA algoritmasının başlangıç çözümü sırasıyla şu şekilde üretilmektedir. Müşteriler ilk önce zaman penceresine göre artan bir şekilde sıralanmaktadır. Bu şekilde ziyaret edilmesi gereken müşteriler zamana göre önceliklendirilmektedir. Bir sonraki aşama olan rotalama aşamasında takımlara sırasıyla müşteriler atanır ve rotalar oluşturulur. Rotalar belirlendikten sonra ise araçların şarj durumları hesaplanır. Eğer gerekli ise rotaya şarj istasyonu eklenir, yani aracın istasyona uğraması sağlanır. Yine benzer şekilde araç herhangi bir istasyona uğramışsa araca yüklenen enerji miktarı hesaplanır. Şarj ile ilgili kararlar verildikten sonra, takımların zaman karar değişkeni hesaplanır. Bir sonraki aşamada zaman penceresi uyumu ve negatif/aşırı şarj durumu ile müşteri ve takımların yetkinliğinin kontrolü yapılır. Bu aşamada bir sapma varsa bu amaç fonksiyonunda cezalandırılır.

DKA algoritması içinde bulunan yerel aramadaki komşuluk yapılarından sırasıyla bahsetmek gerekirse temel olarak yer değiştirme ve ekleme operatörlerini içermektedir. Birinci grup 3 farklı yer değiştirme operatöründen oluşmaktadır, bunlar sırasıyla takım, iş ve şarj istasyonu yerini değiştirerek iyileşme sağlamayı amaçlar. Diğer grupta ise ekleme operatörleri bulunmaktadır. Rasgele seçilen işler aynı veya başka bir rotaya eklenerek çözüm iyileştirmeye çalışılır. Ayrıca herhangi bir aracın şarjı negatife düşerse amaç fonksiyonuna göre en uygun istasyon seçilerek ilgili rotaya eklenir. Benzer şekilde rotada gereksiz istasyon var ise mevcut rotadan çıkarılır. Yerel arama prosedürünün yerel minimumlarda sıkışması durumunda karıştırma prosedürü için yer değiştirme operatörleri kullanılmaktadır.

### 3 Araştırma Sonuçları

#### 3.1 Gerçek problem verisi

Yapılan hesaplamalarda Zamorano ve Stoltetz [21] tarafından kullanılan veri bakım hizmeti sağlayıcısından alınmıştır. Bu veri ile önerilen yöntemin performansı test edilmiştir. Hizmet süresi, zaman penceresi vb. zamana ilişkin veri, bahsi geçen gerçek hayat verisinden aynı dağılımlar kullanılarak üretilmiştir. İlgili makalede olduğu gibi her takımda bulunacak teknisyen sayısı 2 olarak

belirlenmiştir. Lokasyonlar arası mesafeler verilmediğinden, makalede olduğu gibi benzer şekilde mesafeler Google Haritalar'dan toplanmıştır [39]. Samsun şehri ve on yedi ilçe gözetilerek müşteriler konumlandırılmıştır. Ayrıca şarj istasyonları şehirdeki mevcut akaryakıt istasyonları gözetilerek içerisine konumlandırılmıştır. Araçların azami kat edebileceği mesafe 160 km ve 100% şarj olması için gereken süre 180 dk olarak kabul edilmiştir. [40, 41]. Amaç fonksiyonlarında kullanılan maliyet katsayıları şu şekilde hesaplanmıştır: Kat edilen kilometre maliyeti \$0.06, bir aracın maliyeti \$60, bataryayı birim zamanda şarj etmenin maliyeti ise \$0.03 olarak kabul edilmiştir [8]. Kesin sonuçlar Gurobi çözücüsünde çözülmüştür.

#### 3.2 Deneysel çalışmalar

Bu bölümde farklı amaç fonksiyonlarına ilişkin sonuçlar sırasıyla verilmiştir. İlk önce modeller Gurobi ile çözülmüş ve sonrasında sezgisel algoritma ile karşılaştırılmıştır. Tablo 2 model 1'in kesin ve sezgisel algoritma için performans karşılaştırma sonuçlarını içermektedir. Tablo 2 ve 3'te verilen sapma şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$Sapma (\%) = \frac{(f_{\text{çözüm}} - f_{\text{en iyi çözüm}})}{f_{\text{en iyi çözüm}}} * 100 \quad (21)$$

**Tablo 2.** Model 1'e ilişkin karşılaştırma sonuçları

#	Müşteri	Araç	İstasyon	Model 1		Sezgisel metod			Araç sayısı	Çalışma zamanı (sn)
				Amaç	Çalışma zamanı (sn)	Amaç	Sapma %	Çalışma zamanı (sn)		
1	5	4	3	9.23	2	9.23	0.00	2	418.67	
2	5	4	3	9.33	2	9.33	0.00	3	412.45	
3	5	4	3	16.00	2	16.00	0.00	2	423.07	
4	5	4	3	13.50	2	13.50	0.00	1	420.55	
5	10	4	3	16.93	2	16.95	0.14	3	532.92	
6	10	4	3	9.13	2	9.13	0.00	3	529.54	
7	10	4	3	11.13	3	11.56	3.83	4	517.91	
8	10	4	3	8.36	2	8.36	0.00	3	516.53	
9	15	4	4	23.22	3	23.22	0.00	3	532.49	
10	15	4	4	34.90	120	34.95	0.13	3	608.68	
11	15	4	4	21.92	2	21.94	0.10	3	523.63	
12	15	4	4	16.95	7200	16.91	-0.22	2	629.76	
13	20	4	4	24.95	7200	24.35	-2.41	3	826.58	
14	20	4	4	26.09	7200	25.19	-3.45	3	611.70	
15	20	4	4	32.70	7200	32.63	-0.20	3	728.50	
16	20	4	4	20.53	7200	20.53	-0.01	2	810.94	
17	25	6	5	18.18	7200	16.91	-6.93	3	913.18	
18	25	6	5	12.29	7200	11.45	-6.84	3	819.20	
19	25	6	5	12.08	7200	11.24	-6.96	4	911.91	
20	25	6	5	20.34	7200	19.23	-5.43	3	916.14	
21	30	6	5	22.81	7200	21.37	-6.30	4	1100.77	
22	30	6	5	14.12	7200	12.91	-8.56	4	1112.23	
23	30	6	5	13.89	7200	12.95	-6.79	4	1023.49	
24	30	6	5	-	7200	25.95	-	4	993.98	
25	35	6	6	10.50	7200	9.85	-6.23	4	1211.05	
26	35	6	6	9.76	7200	9.11	-6.70	5	1194.68	
27	35	6	6	6.37	7200	5.61	-12.00	5	1213.44	
28	35	6	6	6.90	7200	5.88	-14.79	5	1191.68	
29	40	8	6	8.35	7200	7.82	-6.39	6	1286.50	
30	40	8	6	7.82	7200	6.94	-11.26	5	1262.75	
31	40	8	6	8.63	7200	7.82	-9.36	5	1268.61	
32	40	8	6	8.11	7200	7.44	-8.28	6	1271.19	

Birinci sütunda örnek ismi yer alırken, ikinci, üçüncü ve dördüncü sütunlarda sırasıyla örneklerin içerisindeki iş, araç ve istasyon sayıları belirtilmiştir. Beşinci ve altıncı sütunlarda kesin yönteme ilişkin sonuçlar yer alırken geri kalan sütunlarda sezgisel algoritmaya ilişkin değerler verilmiştir. Kesin algoritma, 24. örneği 7200 saniye içerisinde çözememiş ve herhangi bir değer döndürememiştir. İlk 11 örnek için optimum sonuç bulunabilirken, geri kalan örnekler için uygun çözümler beşinci sütunda verilmiştir. Sezgisel algoritma sonuçları ile kesin yöntem arasındaki fark yüzdelik değer olarak sekizinci sütunda hesaplanmıştır. 5., 7., 10. ve 11. örnekler haricinde sezgisel metot iyileştirme sağlamıştır. Pozitif sapmaların kaynağının kat edilen fazla mesafeden kaynaklandığı aşikârdır. 4. örnek haricinde algoritma birden fazla takım/araç kullanmaktadır.

Tablo 3 model 2'nin kesin ve sezgisel algoritma için performans karşılaştırma sonuçlarını içermektedir. Daha önceden bahsedildiği üzere, model 2'nin amaç fonksiyonu kat edilen mesafenin maliyetiyle takımların kullandığı aracın maliyeti idi. Kesin yöntemle 15., 26., 29., 31. ve 32. örnekler için 2 saat içerisinde bir çözüm döndürülmemiştir ve - işareti ile tabloda gösterilmiştir. Sezgisel yöntem ile 1. ve 4. örnek haricinde iyileştirme sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

**Tablo 3.** Model 2'ye ilişkin karşılaştırma sonuçları

#	Model 2			Sezgisel metot			
	Amaç	Araç sayısı	Çalışma zamanı (sn)	Amaç	Sapma %	Araç sayısı	Çalışma zamanı (sn)
1	70.51	1	2	70.53	0.02	1	475.45
2	70.54	1	2	70.54	0.00	1	375.59
3	76.84	1	2	76.84	0.00	1	380.67
4	73.50	1	2	73.51	0.01	1	425.10
5	137.28	2	20	137.28	0.00	2	587.97
6	129.23	2	7200	128.30	-0.72	2	538.30
7	71.13	1	2	71.13	0.00	1	585.50
8	128.61	2	2	128.25	-0.28	2	537.70
9	144.07	2	7200	143.31	-0.52	2	488.50
10	155.89	2	7200	154.58	-0.84	2	542.40
11	143.05	2	7200	142.57	-0.34	2	495.50
12	136.95	2	7200	136.95	0.00	2	594.20
13	205.37	3	7200	205.20	-0.08	3	623.42
14	210.93	3	7200	209.92	-0.48	3	746.85
15	-	-	7200	214.13	-	3	919.60
16	140.53	2	7200	139.11	-1.01	2	764.69
17	200.57	3	7200	198.62	-0.97	3	809.66
18	136.69	2	7200	135.97	-0.53	2	666.78
19	199.78	3	7200	199.03	-0.38	3	917.85
20	264.37	4	7200	264.28	-0.04	4	934.61
21	202.33	2	7200	142.01	-29.81	2	791.58
22	201.22	3	7200	201.13	-0.05	3	1024.29
23	258.27	4	7200	258.00	-0.10	4	936.16
24	203.04	3	7200	202.55	-0.24	3	835.92
25	255.94	4	7200	255.02	-0.36	4	1063.10
26	-	-	7200	318.49	-	5	977.22
27	260.56	4	7200	260.08	-0.18	4	1070.74
28	252.66	4	7200	252.20	-0.18	4	1343.30
29	-	-	7200	321.63	-	5	1189.70
30	379.51	6	7200	379.46	-0.01	6	1280.91
31	-	-	7200	258.43	-	4	1340.85
32	-	-	7200	193.18	-	3	1252.95

Modellerin kullandığı araç sayıları Tablo 4'te verilmiştir. Model 1 ortalamada 3.53 araç kullanırken model 2 ise ortalama 2.78 araç ile müşterilere ulaşmaktadır. Bu sonuçlar ayrıca atanan teknisyen sayısını da dolaylı olarak göstermektedir. Her bir araçta iki teknisyen olduğu hatırlanacak olursa model 2 ortalamada 5.56 çalışan ile tüm işlerin yapılmasını sağlamaktadır.

Problemde farklı amaç fonksiyonları kullanarak toplam mesafe minimizasyonunun yanı sıra, araç maliyeti de dikkate alınmıştır. Bu sayede farklı maliyet faktörlerinin problemi zorlaştırdığı görülmüştür. Esasında, şarj istasyonlarının kullanım gerekliliği ve bu istasyonlarının doğru konumlandırılması gerektiği de problemi doğrudan etkileyen operasyonel kararlardandır. Ayrıca, kesin çözüm yöntemi ile bazı problemlerin çözülemediği de dikkate alınır, geliştirilen DKA algoritması makul sürede iyi sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Gerçek hayat verisinden üretilen veri seti ile elde edilen sonuçlar bize elektrikli araçların bakım hizmeti sağlayan firmalarda günlük kullanılabilirliğini göstermiştir.

**Tablo 4.** Modellere ilişkin kullanılan araç/takım sayısı

#	Model 1	Model 2
1	2	1
2	3	1
3	2	1
4	1	1
5	3	2
6	3	2
7	4	1
8	3	2
9	3	2
10	3	2
11	3	2
12	2	2
13	3	3
14	3	3
15	3	3
16	2	2
17	3	3
18	3	2
19	4	3
20	3	4
21	4	2
22	4	3
23	4	4
24	4	3
25	4	4
26	5	5
27	5	4
28	5	4
29	6	5
30	5	6
31	5	4
32	6	3
Ortalama	3.53	2.78

#### 4 Sonuç

Bu çalışmada sürdürülebilir işgücü çizelgeleme ve rotalama problemi (S-İÇRP) ARP'nin uzantısı olarak ortaya konulmuştur. Problemede amaç toplam mesafe minimizasyonunun yanı sıra, araç yatırım maliyetini de en aza indirmeyi içermektedir. Ele alınan problemin çözümünde iki farklı amaç fonksiyonu göz önüne alınmış ve farklı amaçlar altında sonuçların etkileri gözlemlenmiştir. Geliştirilen sezgisel yöntem ise E-TRÇP'nin etkin bir şekilde çözebileceğini göstermiştir. Farklı amaç fonksiyonları ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gurobi çözücüsünün bazı problemleri çözemediği gözlemlenirken DKA'nın makul sürede iyi çözümler ürettiği sonucuna varılmıştır. Gerçek hayat verisinden üretilen veri seti ile elde edilen sonuçlar bize elektrikli araçların bakım hizmeti sağlayan firmalarda günlük kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu duruma ek olarak, şarj istasyonu için konum belirlenmesi ayrıca stratejik karar vermede önemlidir çünkü elektrikli araçların kullanımını mevcut teknoloji seviyesinde istasyondan bağımsız düşünülemez. Araçların menzili arttıkça da bu bağımlılığın ortadan kalkacağı aşikârdır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %18**

#### Kaynaklar

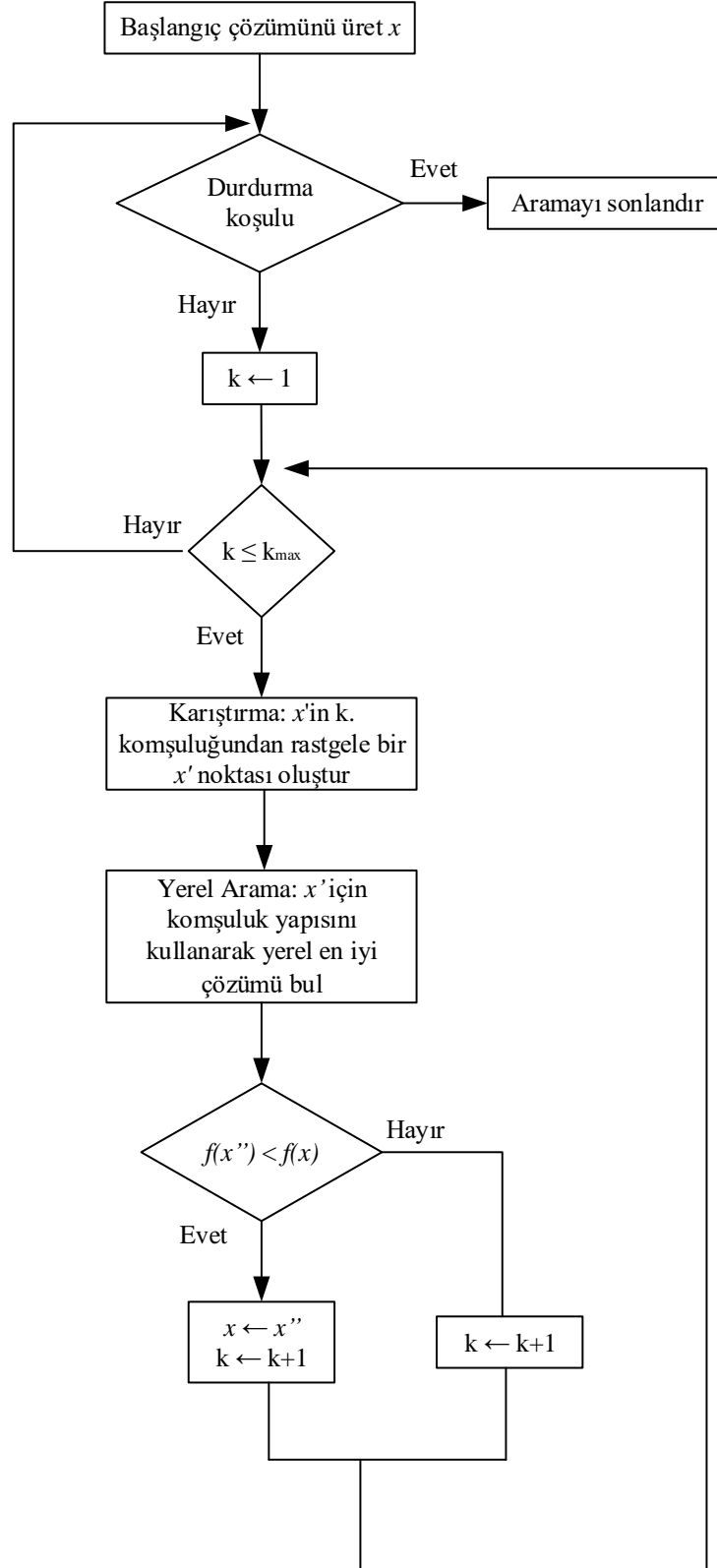
- [1] O. Kherbash ve M. L. Mocan, "A Review of Logistics and Transport Sector as a Factor of Globalization," *Procedia Economics and Finance*, vol. 27, pp. 42-47, 2015/01/01/ 2015, doi: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00969-7](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00969-7).
- [2] T. Haasz vd., "Perspectives on decarbonizing the transport sector in the EU-28," *Energy Strategy Reviews*, vol. 20, pp. 124-132, 2018/04/01/ 2018, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.007>.
- [3] R. Engström, "The Roads' Role in the Freight Transport System," *Transportation Research Procedia*, vol. 14, pp. 1443-1452, 2016/01/01/ 2016, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.217>.
- [4] EU-SCIENCE-HUB. "Transport sector economic analysis." <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/transport-sector-economic-analysis> (accessed 01.04.2020).
- [5] (2014). Technical report No 09/2014 Annual European union greenhouse gas inventory 1990–2012 and inventory report 2014.
- [6] European Commission "Report from the commission to the European parliament and the council –Progress towards achieving the Kyoto and EU2020 objectives.," European Commission., 2014.
- [7] European-Commission, "WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system," ed, 2011.
- [8] M. Schiffer ve G. Walther, "The electric location routing problem with time windows and partial recharging," *European Journal of Operational Research*, vol. 260, no. 3, pp. 995-1013, 8/1/ 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.011>.
- [9] G. Suizo. "Large & recharged: Top electric vehicles." <https://www.greenfleetmagazine.com/155563/large-recharged-top-electric-fleets> (Accessed 01.05.2020).
- [10] A. T. Ernst, H. Jiang, M. Krishnamoorthy, B. Owens, ve D. Sier, "An Annotated Bibliography of Personnel Scheduling and Rostering," (in English), *Ann Oper Res*, vol. 127, no. 1-4, pp. 21-144, 2004/03/01 2004, doi: [10.1023/B:ANOR.0000019087.46656.e2](https://doi.org/10.1023/B:ANOR.0000019087.46656.e2).
- [11] A. T. Ernst, H. Jiang, M. Krishnamoorthy, ve D. Sier, "Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models," *European Journal of Operational Research*, vol. 153, no. 1, pp. 3-27, 2004/02/16/ 2004, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00095-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00095-X).
- [12] J. Van den Bergh, J. Beliën, P. De Bruecker, E. Demeulemeester, ve L. De Boeck, "Personnel scheduling: A literature review," *European Journal of Operational Research*, vol. 226, no. 3, pp. 367-385, 5/1/ 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.029>.
- [13] J. A. Castillo-Salazar, D. Landa-Silva, ve R. Qu, "Workforce scheduling and routing problems: literature survey and computational study," (in English), *Ann Oper Res*, pp. 1-29, 2014/08/14 2014, doi: [10.1007/s10479-014-1687-2](https://doi.org/10.1007/s10479-014-1687-2).
- [14] J.-F. Cordeau, G. Laporte, F. Pasin, ve S. Ropke, "Scheduling technicians and tasks in a telecommunications company," *Journal of Scheduling*, vol. 13, no. 4, pp. 393-409, 2010/08/01 2010, doi: [10.1007/s10951-010-0188-7](https://doi.org/10.1007/s10951-010-0188-7).
- [15] A. A. Kovacs, S. N. Parragh, K. F. Doerner, ve R. F. Hartl, "Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems," *Journal of Scheduling*, vol. 15, no. 5, pp. 579-600, 2012/10/01 2012, doi: [10.1007/s10951-011-0246-9](https://doi.org/10.1007/s10951-011-0246-9).
- [16] A. Lim, B. Rodrigues, ve L. Song, "Manpower allocation with time windows," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 55, no. 11, pp. 1178-1186, 2004/11/01 2004, doi: [10.1057/palgrave.jors.2601782](https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601782).
- [17] Y. Li, A. Lim, ve B. Rodrigues, "Manpower allocation with time windows and job-teaming constraints," *Naval Research Logistics (NRL)*, vol. 52, no. 4, pp. 302-311, 2005, doi: [10.1002/nav.20075](https://doi.org/10.1002/nav.20075).
- [18] A. Dohn, E. Kolind, ve J. Clausen, "The manpower allocation problem with time windows and job-teaming constraints: A branch-and-price approach," *Computers & Operations Research*, vol. 36, no. 4, pp. 1145-1157, 2009/04/01/ 2009, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.011>.
- [19] J. Xu ve S. Y. Chiu, "Effective Heuristic Procedures for a Field Technician Scheduling Problem," *Journal of Heuristics*, vol. 7, no. 5, pp. 495-509, 2001/09/01 2001, doi: [10.1023/A:1011377929184](https://doi.org/10.1023/A:1011377929184).
- [20] V. Pillac, C. Guéret, ve A. L. Medaglia, "A parallel matheuristic for the technician routing and scheduling problem," *Optimization Letters*, vol. 7, no. 7, pp. 1525-



- 1535, 2013/10/01 2013, doi: [10.1007/s11590-012-0567-4](https://doi.org/10.1007/s11590-012-0567-4).
- [21] E. Zamorano ve R. Stolletz, "Branch-and-price approaches for the Multiperiod Technician Routing and Scheduling Problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 257, no. 1, pp. 55-68, 2017/02/16/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.058>.
- [22] M. Erdem, "Elektrikli Araçla Periyodik Teknisyen Rotalama ve İstasyon Yeri Seçim Problemi," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Ejosat, no. Special issue, pp. 16-27, 2020, doi: [10.31590/ejosat.818352](https://doi.org/10.31590/ejosat.818352).
- [23] S. Erdoğan ve E. Miller-Hooks, "A Green Vehicle Routing Problem," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 48, no. 1, pp. 100-114, 1// 2012, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>.
- [24] M. Schneider, A. Stenger, ve D. Goetze, "The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations," *Transportation Science*, vol. 48, no. 4, pp. 500-520, 2014, doi: [10.1287/trsc.2013.0490](https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0490).
- [25] R. G. Conrad ve M. A. Figliozzi, "The Recharging Vehicle Routing Problem," in *Industrial Engineering Research Conference*, T. Doolen and E. V. Aken, Eds., 2011.
- [26] J. Hof, M. Schneider, ve D. Goetze, "Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 97, pp. 102-112, 2017/03/01/ 2017, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.11.009>.
- [27] D. Goetze ve M. Schneider, "Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles," *European Journal of Operational Research*, vol. 245, no. 1, pp. 81-99, 2015/08/16/ 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.01.049>.
- [28] G. Desaulniers, F. Errico, S. Irnich, ve M. Schneider, "Exact Algorithms for Electric Vehicle-Routing Problems with Time Windows," *Operations Research*, vol. 64, no. 6, pp. 1388-1405, 2016, doi: [10.1287/opre.2016.1535](https://doi.org/10.1287/opre.2016.1535).
- [29] G. Hiermann, J. Puchinger, S. Ropke, ve R. F. Hartl, "The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations," *European Journal of Operational Research*, vol. 252, no. 3, pp. 995-1018, 2016/08/01/ 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.01.038>.
- [30] Á. Felipe, M. T. Ortuño, G. Righini, ve G. Tirado, "A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 71, pp. 111-128, 2014/11/01/ 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.09.003>.
- [31] M. Keskin ve B. Çatay, "Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 65, pp. 111-127, 4// 2016, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.013>.
- [32] M. Erdem ve Ç. Koç, "Analysis of electric vehicles in home health care routing problem," *Journal of Cleaner Production*, vol. 234, pp. 1471-1483, 2019/10/10/ 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.236>.
- [33] S. Pelletier, O. Jabali, ve G. Laporte, "50th Anniversary invited article-Goods distribution with electric vehicles: review and research perspectives," *Transportation Science*, vol. 50 (1), pp. 3-22, 2016.
- [34] S. Pelletier, O. Jabali, G. Laporte, ve M. Veneroni, "Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 103, pp. 158-187, 2017/09/01/ 2017, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.020>.
- [35] M. Schiffer, M. Schneider, ve G. Laporte, "Designing sustainable mid-haul logistics networks with intra-route multi-resource facilities," *European Journal of Operational Research*, vol. 265, no. 2, pp. 517-532, 2018/03/01/ 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.067>.
- [36] N. Mladenović ve P. Hansen, "Variable neighborhood search," *Computers & Operations Research*, vol. 24, no. 11, pp. 1097-1100, 1997/11/01/ 1997, [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00031-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00031-2).
- [37] P. Hansen, N. Mladenović, J. Brimberg, ve J. A. M. Pérez, "Variable Neighborhood Search," in *Handbook of Metaheuristics*, M. Gendreau and J.-Y. Potvin Eds. Boston, MA: Springer US, 2010, pp. 61-86.
- [38] P. Hansen ve N. Mladenović, "Variable neighborhood search: Principles and applications," *European Journal of Operational Research*, vol. 130, no. 3, pp. 449-467, 5/1/ 2001, [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00100-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00100-4).
- [39] Google. "The Google Maps Distance Matrix API." <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/intro> (Accessed 01.05.2020).
- [40] S. Edelstein. "2017 electric cars with more than 100 miles of range (updated)." *Green car reports*. [https://www.greencarreports.com/news/1107455\\_2017-electric-cars-with-more-than-100-miles-of-range](https://www.greencarreports.com/news/1107455_2017-electric-cars-with-more-than-100-miles-of-range) (Accessed 01.01.2018).
- [41] E. Schmidt. "Battery Electric Cars Reported Range Comparison." <https://www.fleetcarma.com/2017-battery-electric-cars-reported-range-comparison/> (Accessed 01.05.2020).
- [42.] Ramos, J., Padrón, S., Guillén, L., Piera, M., Guimaran, D., ve Herrero, R. Intelligent platform for sustainable routing, 2010, [https://www.researchgate.net/publication/236455075\\_Intelligent\\_platform\\_for\\_sustainable\\_routing](https://www.researchgate.net/publication/236455075_Intelligent_platform_for_sustainable_routing) (Accessed 01.12.2021).



Ekler



Şekil A.1. DKA akış diyagramı [42]



## Kümeleme analizi ile konut seçimi sürecinde deprem riski tabanlı bir yaklaşım önerisi

### Suggestion for a earthquake risk-based approach in the housing selection process with cluster analysis

Furkan Dişkaya<sup>1</sup>, Şenol Emir<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Beykent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34485, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Üniversitesi, Ekonometri Bölümü, 34452, İstanbul, Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada, insan yaşamının önemli kararlarından biri olan konut seçimi konusu risk tabanlı bir yaklaşım ile İstanbul ili kapsamında ele alınmıştır. Konut seçimi için hazırlanmış diğer araştırmalar incelendiğinde, literatürde genel kabul gören çeşitli karar ölçütleri kapsamında uygulamalar görülmüştür. Ancak, her konut seçimi yaşanan bölgenin farklı gereksinimlerine uygun yapılması gereken hayati ve telafisi zor bir karardır. İstanbul gibi deprem kuşağında yer alan bir yerleşim bölgesinde, deprem riski son derece önemli bir karar ölçütü teşkil edecektir. Çalışma uygulamasında, İstanbul ili mahalleler bazında Kümeleme Analizi ile risk derecesine göre kümelere ayrılmıştır. Bulunan deprem riski ölçütü literatür ve online emlak kurumlarından elde edilen diğer ölçütler ile uzman görüşleri ışığında Analitik Hiyerarşi Prosesi yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Bu ağırlıklı ölçütler yardımıyla VIKOR yöntemi uygulanarak örnek konut seçimi sıralaması elde edilmiştir. Sıralama işlemi, yeni ölçütün karar analizine dâhil edildiği ve edilmediği durumlar için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalı analizler sonucunda, konut seçimi için yeni bir karar ölçütü olarak belirlenen deprem riskinin, ekonomik, fiziki ve sosyal diğer karar ölçütleri kadar dikkate alınması gerekliliği vurgulanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Konut seçimi, Deprem riski, Kümeleme analizi, AHP, VIKOR yöntemi.

#### 1 Giriş

Toplumsal hayatın devamlılığının sağlandığı ve insanların barınma ihtiyaçlarını karşıladıkları yaşam alanları olan konutlar, zaman içerisinde hukuki, ekonomik, sosyal ve kültürel özellikleri bakımından değişime uğramıştır. Bu değişim ile birlikte, günümüzde barınma ve yaşamın devamlılığı ihtiyacını karşılamının yanında, toplumsal kabul, yatırım aracı ve bir statü göstergesi olarak da görülmektedirler [1]. Konut, genel anlamda heterojen ve karmaşık yapıda bir üründür. Çünkü konut talep edenlerin konut özellikleri için bilinç yapıları seçim davranışları seviyesinde karmaşıktır. Konut seçenekleri kullanıcıların yaşama bakış açılarının bir yansımasıdır. Buna bağlı olarak

#### Abstract

In this study, the issue of housing selection, which is one of the important decisions of human life, is discussed within the scope of Istanbul province with a risk-based approach. When studies in the literature focusing on housing selection are examined, it is seen that there exist applications that are within the scope of various decision criteria. However, each choice of housing is a vital and difficult decision to make under the different needs of the region. In a residential area located in an earthquake zone such as Istanbul, earthquake risk will be an extremely important decision criterion. In the application, clustering analysis is applied to group the neighborhoods in Istanbul according to their risk levels. The earthquake risk criterion is weighted using the Analytical Hierarchy Process method based on extensive literature review and other criteria obtained from online real estate institutions and expert opinions. By using these weighted criteria, a sample house selection ranking is obtained by the VIKOR method. The ranking process is carried out in two separate ways, including and not including the new risk criteria in decision analysis. As a result of the comparative analyses, it is emphasized that the earthquake risk, which is determined as a new decision criterion for housing selection, should be taken into account as much as other economic, physical and social decision criteria.

**Keywords:** Housing selection, Earthquake risk, Cluster analysis, AHP, VIKOR method

kullanıcılar, farklı seçeneklere farklı tercihler ile yaklaşmakta ve kendi ihtiyaçlarına en uygun seçimleri yapmak istemektedirler [2]. Dolayısıyla konut seçiminde birçok farklı ölçüt etkin olmakta, konut seçeneklerinin ve seçim ölçütlerinin de artması sonucunda konut seçimi çok kriterli bir karar verme problemi haline gelmektedir [3].

Konut satın alımı yüksek miktarda finansal kaynağa ihtiyaç duyulması nedeniyle bireylerin yaşamları boyunca verdikleri önemli tercihlerin başında gelmektedir. Yaşam döngüsü içerisinde genel olarak bir veya iki defa karar verilen konut seçimi kararı, hane halkının yaşadığı ülke ve şehir gereksinimlerine göre değişebilecek çok yönlü ele alınması gereken zor bir problemdir [4]. 1960'lı yıllarda hız

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: : senol.emir@istanbul.edu.tr (Ş. Emir)

Geliş / Received: 14.08.2021 Kabul / Accepted: 11.02.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.982824

kazanan kentleşme kavramı ile konut seçimi ve bireylerin tercihleri sıklıkla araştırmalara konu olmuştur. Ekonomik, sosyolojik ve coğrafi başta olmak üzere farklı bakış açılarına göre konuyu inceleyen araştırmacılar [5], şehir planlama aşaması için idareci ve planlamacılara değerlendirilmesi gereken çok sayıda girdi sunmaktadır [6]. Günümüzde internet üzerinde faaliyet gösteren inşaat firmaları ve emlak portallarının yüksek miktarda alternatifler sunması, özellikle çok sayıda konut stokunun bulunduğu büyük şehirlerde seçimi zorlaştırmaktadır. Emlak piyasasında genel kabul gören kriterler ile birlikte ulaşım, semt algısı, ses ve çevre kirliliği, eğitim kurumlarına yakınlık, olumsuz doğal koşullar vb. kriterler büyük şehirler için ön plana çıkmıştır.

İstanbul ilinde beklenen deprem afeti bireylerin konut seçiminde olumsuz doğa şartları kriterini dikkate almalarına sebep olan güncel bir vakadır. Deprem, heyelan gibi olumsuz doğal şartlar maddi ve çevresel sorunlara yol açarken, mevcut riskleri artırmaktadır. Bu nedenle bireyler, olumsuz doğa şartlarından meydana gelebilecek risklerin en düşük seviyede olduğu yerleşim alanlarını seçme eğilimi gösterirler [7]. Konut seçimi hakkında literatür incelendiğinde, konut seçimini belirleyen faktörler ve konut seçimi ile ilgili birçok farklı çalışma yer almaktadır. Ancak olumsuz doğa şartları temelinde deprem riskini karar ölçütü olarak ele alan İstanbul ili için uygulanmış herhangi bir ulusal ve uluslararası çalışmaya rastlanmamıştır.

Literatürde konut seçimi hakkında yapılan çalışmalarda, problem yapısı çok fazla alternatif ve kritere sahip olduğundan, birden fazla hedefi birlikte dikkate alarak çözüm üretebilen çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri sıklıkla kullanılmıştır [8]. Ancak, Kümeleme Analizi konut seçimi problemleri kapsamında ulaşılan herhangi bir çalışmada kullanılmamıştır. Kümeleme analizi, benzer özelliklerine göre verilerin gruplandırılması işlemi olarak tanımlanabilir. Kümeleme tekniği, kümelerin aralarındaki benzerliği minimuma indirme ve kümelerin içindeki birimlerin benzerliğini maksimuma yükseltme temeline dayanmaktadır. Verilerin benzerliği üzerinden doğal gruplara ayırma süreci olarak tanımlanan yöntem, verilerin arasında fark edilmeyen ilişkilerin ortaya çıkarılması, boyut indirmeye ve aykırı değerlerin tespit edilmesi amacıyla kullanılmaktadır [9].

ÇKKV, genel olarak birbiriyle çelişen somut veya soyut niteliklere göre karar seçenekleri içerisinde en iyisini eş zamanlı olarak seçmek, sıralamak veya sınıflandırmak amacıyla uygun yöntemlerin kullanılması bütünüdür [10].

En sık uygulanan ÇKKV yöntemlerinden birisi olan Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ilk olarak Saaty tarafından önerilmiştir. AHP çok sayıda alternatif arasından karar vericilerin belirlediği kriterler temelinde karar seçeneklerini önem seviyesine göre sıralayan bir yöntemdir [11]. VIKOR yöntemi ise Opricovic ve Tzeng tarafından ilk olarak karmaşık yapıdaki çok kriterli problemlerin optimizasyonu amacıyla geliştirilmiştir [12]. Bu teknik, belirli alternatifler arasından seçim ve sıralama yaparak karar vericilere nihai çözüme ulaşabilmek için yardımcı olacak çelişkili kriterler içerisinde uzlaşma çözümünü belirler [13].

Bu çalışmada, risk tabanlı bir yaklaşım ile İstanbul ilinde konut satın almak isteyen bir tüketicinin en uygun konut

seçimini gerçekleştirmesi amaçlanmıştır. Problem çözümü için Kümeleme Analizi, AHP ve VIKOR yöntemleri birlikte uygulanmıştır. Uygulama için seçilen karar kriterleri, literatürden elde edilen karar kriterlerinin yanında, İstanbul ili sınırlarında ikamet etmek amacıyla ev arama sürecinde olan 5 bireyden ve çeşitli ilçelerde bulunan 5 emlak danışmanının görüşleri ile tüketiciler tarafından en sık kullanılan çevrimiçi web sitesi olan Sahibinden (<https://www.sahibinden.com>) emlak portalından elde edilen veriler göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Aynı bireylerden belirlenmiş karar kriterlerine önem derecelerine göre puan vermeleri ve ikili karşılaştırma değerlendirmesi yapmaları da istenmiştir ve buna göre AHP ağırlık skorları oluşturulmuştur. Bu değerlendirmeler önce belirlenen karar kriterleri için yapılmıştır. Sonra önerilen “deprem riski” kriteri karar kriterlerine eklenmek suretiyle skorlama işlemi tekrar yapılarak iki farklı karar kriteri listesi oluşturulmuştur. Böylece, genel kabul gören kriterlere ek olarak “deprem riski” kriteri eklenerek risk tabanlı bir yaklaşım amaçlanmıştır. Deprem riski kriteri için, İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü (DEZİM) bünyesinde İstanbul’un her mahallesi için hazırlanan rapordaki [14] değerler kullanılmıştır. Kümeleme Analizi yardımıyla risk değerleri İstanbul ili mahalleleri için 3 seviye olarak kümelmiştir. Alternatifler ise, aynı portal üzerinden İstanbul ilinde yıllık nüfus artış hızı [15] en yüksek olan ilk 5 ilçeden rastgele 3’ er adet satılık konut belirlenmesi şeklinde oluşturulmuştur. VIKOR yöntemi kullanılarak AHP ile ağırlıklandırılmış kriterler üzerinden alternatif konutlar sıralanmıştır. Bu uygulama risk tabanlı yaklaşımın genel kabul gören yaklaşıma göre karşılaştırmalı önemini ortaya koymuştur. Konut seçimi problemlerinde, İstanbul ili gibi afet riski altında olan bölgeler için risk tabanlı yaklaşımın önemi vurgulanmıştır.

Çalışmada yer alan deprem riski kriteri, ÇKKV kapsamında konut seçimi problemleri için özgündür. Bilimsel yazında incelenen uygulamalar dikkate alındığında, kişisel bir tercih olan konut seçimi problemlerinde konutun bulunduğu yerleşim alanının deprem afeti riskini dikkate almadıkları görülmüştür. Bazı çalışmalarda sadece konutun deprem dayanıklılığı malzeme ve yapı değerleri üzerinden dikkate alınmıştır. Ancak, deprem riski kriteri konutun altyapı, üst yapı ve jeolojik açıdan bütüncül bir yaklaşımla ele alınması sonucunda elde edilmesi gereken detaylı bir analiz gerektirmektedir. Çalışmada deprem riski kriteri için kullanılan deprem riski raporu altyapı, üst yapı ve jeolojik veriler eşliğinde elde edilmiş güncel ve resmi bir veri sunmaktadır. Buradan yararlanılarak konut tercihinin yapılacağı İstanbul kapsamında her bir mahalle için bir deprem riski ölçütü oluşturmak uygun görülmüş ve çalışmaya eklenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür taramasına, üçüncü bölümünde Kümeleme Analizi tanıtımına, dördüncü bölümünde AHP ve VIKOR yöntemlerine, beşinci bölümde çalışma uygulamasına ve altıncı bölümde elde edilmiş sonuçlara yer verilmiştir.



## 2 Literatür taraması

Bilimsel yazın incelendiğinde konut seçimi hakkında çok fazla sayıda çalışmaya ulaşılmıştır. Birçok ulusal ve uluslararası bilimsel veri tabanının incelendiği çalışmalarda, konut tercihini etkileyen karar kriterlerinin belirlenmesi ve alternatif konutların seçimi şeklinde uygulamalar gözlenmiştir. Bu uygulamalarda analiz metodu olarak ÇKKV yöntem/yöntemleri farklı şekillerde kullanılmıştır. Fakat Kümeleme Analizi yönteminin konut tercihi ve/veya konut seçimi problemleri için doğrudan kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bazı çalışmalarda sadece yerleşim bölgelerinin veya birimlerinin çeşitli özelliklerine göre gruplanması amacıyla kısıtlı sayıda çalışmada yer almıştır. Ayrıca risk tabanlı yeni bir konut seçimi ölçütü olarak önerilen yerleşim alanlarının deprem riski kriterinin, alternatif konut seçimi için kullanıldığı herhangi bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Konut tercihini etkileyen kriterlerin incelendiği bazı çalışmalarda sadece binanın depreme dayanıklılığı ölçütü olarak ifade edilmiştir.

Çalışmanın bilimsel yazın taramasında, konut tercihi, konut seçimi problemleri ve ÇKKV yöntemleri ile hazırlanan konut seçimi çalışmalarına ve ilgili konularla ilişkili kümeleme analizi uygulamalarına yer verilmiştir.

### 2.1 Konut tercihi ve konut seçimi problemleri çalışmaları

Konut seçimi ile ilgili literatürde birçok farklı çalışma yer almaktadır. Çalışmalar, konut tercihi ve konut seçimi adı altında 1960'lı yıllardan beri yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Geçmiş çalışmaların birçoğunda konutların satın alınabilirliği sıkça ekonomik uygulanabilirlik kapsamında değerlendirilmektedir [16]. Ancak, konut kalitesi, konutun yeri ve güvenliği gibi diğer önemli unsurlar genel olarak göz ardı edilmiştir [2]. Muth [17], Alonso [18] ve Lowry [19] çalışmalarında konut seçimi problemine ekonomik analiz temelinde yaklaşmışlardır. Rossi [20] ekonomik temelli analizlerden farklı olarak, aile büyüklüğü, cinsiyeti ve yaşındaki değişimlerin ele alındığı hane halkı "yaşam döngüsü" değişimi modelini geliştirmiştir. Wolpert, Brown ve Moore, Pickvance ve Speare ise Rossi' nin yaşam döngüsü modelinin eksik olduğunu öne sürerek, "yer faydası", "karar belirleme süreci", "nedensel yer değişimi süreci" ve "konut memnuniyeti" modellerini geliştirmişlerdir [21]. Kendig [22] yaşam döngüsü ile mülkiyette meydana gelen değişimin yakından ilişkili olduğunu ileri sürmüştür.

Tremblay ve Dillman [23] konut seçimi yapacak tüketicilerin gelir düzeyi, eğitim durumu ve mesleğinin konut tercihlerini doğrudan etkileyen unsurlar olduğunu ifade etmişlerdir. Kang ve Gardner [24] çalışmalarında konut pazarı şartları, pazarlama süresi, satış fiyatı ve konut özelliklerinin aralarındaki ilişkileri analiz etmiştir. Clark ve Onaka [25] çalışmalarında istemli ve istemsiz konut yeri hareketliliği kavramını ortaya koymuştur. Jin ve Zeng [26] çalışmalarında faiz getirisi ve yatırım amaçlı konut tercihinin ilişkisini incelemiştir. Fisher ve diğ. [27] güvenlik, konutun muhiti, satın alınabilirliği gibi hane refahını belirleyen çeşitli özelliklerin konut fiyatını önemli ölçüde belirlediğini öne sürmüş ve tüketici tercihlerini doğrudan etkilediğini ifade etmişlerdir. Kaba [28] konut alma sürecinde karar almayı

etkileyen faktörler ile alıcı profillerinin belirlemesi amacıyla yaptığı çalışmada, karar vericilerin demografik özelliklerinin konut seçimi kriterlerini etkilediği sonucuna varmıştır. Opoku ve diğ. [29] çalışmalarında düşük gelire sahip tüketicilerin konut tercihlerinde özel yaşam alanları, finansal özellikler ve konutun mimari estetiği faktörlerine öncelik verdiklerini tespit etmişlerdir. Tosun ve Fırat [30] konut tercihi hakkındaki çalışmalarında, tercihleri etkileyen kriterlerin tespiti için anket çalışması yapmışlar ve en önemli kriterlerin sırasıyla konut fiyatı, güvenlik ve depreme dayanıklılık olduğu anlaşılmıştır. Kalelioğlu ve Özgür [31] ikametgâh hareketliliği ve konut yerinin seçimini yaşanan bölge memnuniyeti temelinde konut seçimini etkileyebilecek kriterleri belirlemişlerdir. Çalışmaya göre hane halkının geliri, konutun tipi ve hane büyüklüğü gibi kriterlerin önemli olduğu ifade edilmiştir.

### 2.2 ÇKKV yöntemleri ile gerçekleştirilen konut seçimi çalışmaları

Klasik karar alma yöntemlerinden farklı olarak sadece nicel değil aynı zamanda nitel değerleri de kullanmak suretiyle daha dinamik karar mekanizmalarına sahip olan ÇKKV yöntemleri, birçok nicel ve nitel karar ölçütü değişkenine sahip olan konut seçimi problemlerinde sıklıkla kullanılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında ÇKKV yöntemleri tek başına kullanılırken, bazı çalışmalarda ise diğer yöntemler ile bütünsel olarak kullanılmıştır.

Saaty [32], konut büyüklüğü, konut yaşı, ulaşım, muhit özellikleri, bahçe alanı, genel yapı şartları, mevcut finansman durumu ve sosyal imkânları seçim kriterleri olarak belirlemiş ve AHP yöntemi ile üç konut alternatifini değerlendirmeye alarak konut seçimini gerçekleştirmiştir. Ball ve Srinivasan [33] sekiz ana ve yirmi dokuz alt kriteri kullanarak AHP yöntemiyle konut seçimi problemi uygulaması yapmıştır. Schniederjans ve diğ. [34], konut seçimi kararı için AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış kriterler yardımıyla Hedef Programlama modeli oluşturmuşlardır. Çalışmada, muhit, sosyal imkânlar, yakınlık, kamu kurumlarına ve ulaşım merkezlerine yakınlık, konutun iç ve dış özellikleri gibi seçim kriterleri kullanılmıştır. Bender ve diğ. [35] konut seçiminde AHP yöntemi ve Coğrafi Bilgi Sistemlerini birlikte kullandıkları çalışmada konut seçimi analizi gerçekleştirmişlerdir. Kauko [36] çalışmasında AHP yöntemini kullanarak konut seçimi yapmış ve uzman görüşleri ışığında ulaşım, konum, işyerine yakınlık, sosyal imkânlar, yerel yönetim uygulamaları gibi kriterleri kullanmıştır. Timor [37], konut büyüklüğü, fiyat, evin cephesi, oda sayısı, bina yaşı, depreme dayanıklılık, sosyal imkânlar, ulaşım, inşaat kalitesi gibi kriterler ile dört alternatif içerisinden AHP yöntemi ile konut seçimi çalışması yapmıştır. Yıldırım [38] Gri İlişkisel Analiz yöntemini kullanarak yaptığı konut seçiminde, fiyat, oda sayısı, konut büyüklüğü, mesafe, bina yaşı ve yeşil alan olmak üzere altı karar kriteri kullanmıştır. Onan [39], İzmir ili Karşıyaka ilçesi sınırlarında yer alan konut projelerinin seçimi için yaptığı çalışmada, büyüklük, konfor, oda sayısı, konum gibi kriterler yardımıyla PROMETHEE ve GAIA düzlemi yöntemlerini uygulamıştır. İpek ve Şahin [1]



çalışmalarında konut seçimi kriterlerinin ağırlıklandırılması için AHP yöntemini, konut alternatiflerinin sıralaması için ise Gri İlişkisel Analiz yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada konutun fiziki özellikleri, bina ve site özellikleri, fiyat, muhit algısı, satıcı özellikleri ve sosyal alanlara uzaklık ana kriterler olarak belirlenmiştir. Eş ve Yılmaz [21], evin fiyatı, büyüklük, bina yaşı, bina kat durumu, evin cephesi, güvenlik ve kapıcı, manzara, otopark ve evin iç özelliklerini seçim kriteri olarak belirledikleri çalışmalarında, kriterlerin ağırlıklandırılması için AHP yöntemi kullanılmıştır. Belirlenen on adet alternatifin sıralama tespiti için ise VIKOR yöntemi uygulanmıştır. Alkan ve Durduran [3] çalışmalarında konut seçimi kriterleri olarak fiyat, bina yaşı, kullanım alanı, oda sayısı, bulunduğu kat, evin güneş alan cephesi, ısıtma türü ve şehir merkezine uzaklığı belirlemiştir. Kriterlerin ağırlıklandırılması için AHP yöntemini ve alternatif sıralaması için ise TOPSIS yöntemini uygulamışlardır.

Bilimsel yazında konu hakkında gerçekleştirilen çalışmalara göre, birçok farklı seçim kriterinin bireysel tercihlere göre değişebileceğinin söz konusu olduğu anlaşılmıştır.

Çalışmalarda genel kabul gören karar kriterleri Tablo 1'de yer verilmiştir.

**Tablo 1.** Konut seçim sürecinde kullanılan kriterler

Kriterler	Referanslar
Fiyat	[1],[3],[21],[24],[30],[31],[32],[33],[34],[35],[36],[37],[38],[39]
Konutun kullanım alanı	[1],[3],[21],[24],[31],[32],[35],[36],[37],[38]
Oda sayısı	[1],[3],[21],[31],[32],[33],[34],[35],[36]
Bina yaşı	[1],[3],[31],[34],[35],[36],[37],[38],[39]
Bulunduğu kat	[1],[3],[21],[31],[32],[33],[34],[35]
Bina ısıtma türü	[1],[3],[31],[34],[35],[36],[37],[38],[39]
Krediye uygunluğu	[1],[3],[21],[31],[35],[36],[37],[38],[39]
Konut satışı yapan kişi ya da kurum	[1],[31],[33],[34],[35],[36],[37]
Cephe	[1],[3],[21],[31],[32],[33],[34],[35],[38],[39]
Güvenlik sistemi	[1],[3],[21],[30],[31],[32],[33],[34],[35],[36]
Muhit algısı	[3],[21],[27],[31],[32],[33],[34],[35],[36],[37]
Ulaşım olanakları	[1],[3],[31],[33],[34],[35],[36],[37],[38],[39]
Otopark	[1],[3],[31],[37],[38],[39]
Şehir merkezine uzaklık	[1],[3],[31],[32],[34],[35],[37],[38],[39]
Sosyal olanaklar	[1],[3],[21],[27],[31],[32],[33],[34],[35],[36],[37],[38],[39]
Sıfır ya da ikinci el olması	[1],[3],[21],[32],[33],[34],[35],[36],[37],[38],[39]
İç ve dış özellikleri	[1],[3],[21],[31],[32],[33],[34],[35],[36],[37],[38],[39]

Literatür çalışmasından elde edilen kriterler uzman görüşleri, tüketiciler ve çevrimiçi emlak sitelerinden elde

edilen bilgiler doğrultusunda düzenlenmiş ve uygulamada kullanılmıştır.

### 2.3 Kümeleme analizi ile ilgili çalışmalar

Bilimsel yazında konu hakkındaki Kümeleme Analizi uygulamalarından bazılarının yer verilmiştir. Sicilia ve diğ. [40], endüstriyel yöntemlerle geliştiren uygun fiyatlı konutların tasarımı, inşası ve kullanımında yer alan farklı aktörlerin etkileşimini kolaylaştıran barkod konut sistemini oluşturmak amacıyla k-ortalama yöntemini kullanmışlardır. Helbich ve diğ. [41], konut piyasalarının veriye dayalı bölgeselleştirilmesi amacıyla Kümeleme Analizinden faydalanmışlardır. Gabrielli ve diğ. [42], konut piyasalarının bir kentsel alan içinde mekansal olarak alt bölümlere ayrıldığı ve konut piyasalarının nasıl çalıştığının anlaşılabilmesi için konut alt pazarlarının belirlenebilmesi amacıyla Kümeleme Analizi yöntemini uygulamışlardır. Çelik ve Kiral [43], Türkiye il grupları üzerinde konut talebinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada Kümeleme Analizi ve SWOT Analizi yöntemlerini kullanmışlardır. Aksoy ve Irwin [44], konut piyasalarının bölümlendirilmesi amacıyla, konutların bazı değişkenlere göre gruplandırılması için Kümeleme Analizi yöntemini uygulamışlardır. Akay ve diğ. [45], Türkiye'de gurbetçi Türkler ile yabancı bireylerin konut taleplerinin incelenmesi amacıyla Panel Veri Kümelemesi ve k-prototip algoritmasını kullanmışlardır. Zhang ve Hu [46], Kümeleme algoritmasının kullanarak Hong Kong, Guangdong ve Makao bölgeleri için toplu konutların tahsis modellerini oluşturmuşlardır.

Türkler ile yabancı bireylerin konut taleplerinin incelenmesi amacıyla Panel Veri Kümelemesi ve k-prototip algoritmasını kullanmışlardır. Zhang ve Hu [46], Kümeleme algoritmasının kullanarak Hong Kong, Guangdong ve Makao bölgeleri için toplu konutların tahsis modellerini oluşturmuşlardır.

### 3 Kümeleme analizi ile ilgili çalışmalar

Birbirine benzer ya da yakın öğelerin oluşturdukları topluluğa küme denilmektedir. Kümeleme analizi ise gruplanmamış (ham) gözlemleri sahip oldukları özellikleri dikkate alarak kümelemek (homojen alt gruplara ayırmak) amacıyla geliştirilmiş istatistiksel yöntemler topluluğu olarak tanımlanır. Burada temel olarak verinin içindeki doğal grupların-kümelerin tanımlanması hedeflenir [47]. Bu nedenle her bir küme içinde yer alan gözlemlerin kendi içlerinde olduğunca benzer, bunun tersine diğer kümelere yer alan gözlemlerle olabildiğince farklı yapıda olmaları beklenir. Kümeleme algoritmaları temel olarak hiyerarşik temelli (BIRCH, CURE, CHAMELON), bölümleyici (k-means, k-medoids, CANOPY), yoğunluk temelli (DBSCAN, OPTICS, DENCLUE), ızgara temelli (STING, CLIQUE) ve alt uzay arama temelli (PROCLUS, SUBCLUE) olarak sınıflandırılır [48].

#### 3.1 k-means (k-ortalama) yöntemi

k-means yöntemi bölümleyici kümeleme yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemlerde başlangıçta küme sayısının (K) belirlenmesi gerekir. Küme sayısının başlangıçta belirtilmesi zorunluluğu, kümeleme sonuçlarının başlangıç atamalarına

bağlı olması gibi eksi yönlerine rağmen  $k$ -means kolay açıklanabilir olması, yazılım paketlerinde yaygın olarak bulunması, yüksek boyuttaki verilerde de uygulanabilmesi nedeniyle en yaygın olarak kullanılan kümeleme algoritmasıdır.

$k$ -means her bir gözlemi birbiriyle kesişmeyen kümelerden birine atayacak şekilde çalışır. Yöntem küme içindeki homojenliği sağlayabilmek için gözlemler ile küme merkezi arasındaki toplam mesafenin minimum olması gerektiği görüşüne dayanır. Bunun için kümeleri temsil eden  $K$  tane çekirdek değeri (merkez) belirlenir ve bu değerler algoritma adımlarında güncellenir.  $k$ -means yöntemi adımı küme merkezi olarak kümeye atanan gözlemlerin ortalamasının alınmasından alır.  $i = 1, 2, \dots, n$  ve  $j = 1, 2, \dots, p$  olmak üzere  $p$  boyutlu  $n$  adet gözlemin  $C_1, \dots, C_K$  kümelerine ayrılması için yöntemin kullandığı amaç fonksiyonu Denklem (1) de gösterilmiştir.

$$\min_{C_1, \dots, C_K} \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_{kj})^2 \right\} \quad (1)$$

Amaç fonksiyonundaki  $x_{ij}$   $i$ . gözleme ait  $j$ . öznelik değerini,  $\bar{x}_{kj} = \frac{1}{|C_k|} \sum_{i \in C_k} x_{ij}$  değeri  $C_k$  kümesindeki  $j$ . özneliğin ortalamasını ve  $|C_k|$ ,  $k$  kümesi içinde o andaki gözlem sayısını göstermektedir. Mesafeleri ölçmek için farklı uzaklık ölçüleri kullanılsa da en yaygın olarak kullanılanı Öklid uzaklığıdır [49].  $K$ , küme sayısını ve  $n$  gözlem sayısını gösterdiğinde toplam farklı gözlem-küme atama sayısı  $K^n$  olacaktır. En azından  $n$  değerleri genelde yüksek olacağından  $K^n$  değeri yüksek olacaktır. Bu nedenle en iyi sonucu bulmanın etkin bir yolunu bulmak gerekir [50]. Aşağıda belirtilen adımlar etkin bir çözüm sağlar. Yöntemin aşamaları şu şekilde özetlenebilir [51]:

**Adım 1:**  $K$  tane başlangıç çekirdeği rastgele olarak belirlenir.

**Adım 2:**  $K$  tane çekirdeğin belirlenmesinin ardından geriye  $n-K$  adet gözlem kalır. Geriye kalan bu gözlemler kendilerine en yakın gözlemin bulunduğu kümeye atanır ve küme merkezleri güncellenir. Güncelleme sonucu küme içinde yer alan gözlemlerin ortalama vektörü hesaplanarak yeni küme çekirdeği olarak bu vektör kullanılır.

**Adım 3:** Tüm gözlemlerin yeni belirlenen  $K$  çekirdeğe olan mesafeleri hesaplanır. Bir gözlem için kendi kümesinin çekirdeğinden daha yakın bir çekirdekle karşılaşırsa gözlem bu yeni çekirdeğin ait olduğu kümeye atanır ve küme çekirdekleri tekrar güncellenir.

**Adım 4:** Adım 2 ve Adım 3 kümeler arasındaki geçişler durana kadar tekrarlanır.

## 4 ÇKKV yöntemleri

### 4.1 AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi)

AHP karmaşık karar problemlerinde, karar alternatif ve kriterlerine göreceli önem değerleri verilmek suretiyle yönetsel karar süreçlerinin çalıştırılması esasına dayanan bir karar verme sürecidir [52]. Bu uygulamada AHP sadece

ağırlıkların belirlenmesi için kullanıldığından yöntemin ağırlıkların belirlenmesi ile ilgili aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

### 1. Aşama: İkili karşılaştırma matrisinin oluşturulması

$m$  alternatiften ve  $n$  kriterden oluşan bir karar verme probleminde kriterlerin ağırlıklarının hesaplanabilmesi için uzmanlarca kriterlerin ölçü birimlerine bakılmaksızın sadece birbirine göre önem dereceleri dikkate alınarak ikili karşılaştırma matrisi ( $X$ ) Denklem (2) oluşturulur.  $n$  kriter için oluşturulan ikili karşılaştırma matrisi  $n \times n$  boyutundadır ve yapılması gereken toplam karşılaştırma sayısı  $n(n-1)/2$  olur. Önem dereceleri için Tablo 2 deki değerler kullanılır.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{12} & \dots & \dots & \dots & x_{1n} \\ \frac{1}{x_{12}} & 1 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & x_{ij} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \frac{1}{x_{ij}} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ \frac{1}{x_{1n}} & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2)$$

**Tablo 2.** İkili karşılaştırma ölçeği [53].

Ölçek	Tanım	Açıklama
1	Eşit önemli	İki faaliyet amaca eşit şekilde katkıda bulunur
3	Birinin diğerine göre çok az önemli olması	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine çok az derecede tercih ettirir.
5	Kuvvetli derecede önemli	Tecrübe ve yargı bir faaliyeti diğerine kuvvetli derecede tercih ettirir.
7	Çok kuvvetli derecede önemli	Bir faaliyet güçlü bir şekilde tercih edilir ve baskınlığı uygulamada rahatlıkla görülür.
9	Aşırı derecede önemli	Bir faaliyetin diğerine tercih edilmesine ilişkin kanıtlar çok büyük güvenilirliğe sahiptir.
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılmak üzere yukarıda listelenen yargılar arasında düşen değerler.

### 2. Aşama: Kriterlerin ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık kontrolü

Tutarlılığı belirlemek için Saaty, Tutarlılık İndeksini (Consistency Index-CI) önermiştir. Bu değer Denklem (3) de gösterildiği gibi hesaplanır.

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

Denklem (3) de yer alan  $\lambda_{\max}$  değeri ikili karşılaştırma matrisinin maksimum özgedğerini göstermektedir ve sadece ikili karşılaştırma matrisi tutarlı olması durumunda  $n$  değerini alır. Tutarlılık olması durumunda ise  $n$  den büyük bir değer almaktadır. Fakat yapılan çalışmalarda tutarlılığın tam olarak belirlenebilmesi için CI değerinin yerine Tutarlılık Oranı (Consistency Ratio-CR) değerinin

kullanılmasının daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu oran **Denklem (4)** de gösterilmiştir. Her bir kriter kendine göre eşit önemdedir ( $x_{ii} = 1$ ).  $i$ . kriter ile  $j$ . kriter karşılaştırılırken değer olarak  $x_{ij}$  olarak belirlenmiş ise  $j$ . kriterin  $i$ . kritere göre önemi  $x_{ji} = 1/x_{ij}$  olur. İkili karşılaştırmalarda oluşabilecek tutarsızlıkları belirleyebilmek için sonraki adımda tutarlılık karşılaştırması yapılır.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

**Denklem (4)** de yer alan RI Rassal İndeks değerini göstermektedir. Farklı  $n$  değerlerine karşılık tanımlanan RI değerleri Tablo 3 de verilmiştir. İkili karşılaştırmaların tutarlı olabilmesi için CR değerinin 0.10 dan küçük olması beklenir.

**Tablo 3.** Rassal İndeks (RI) değerleri [52].

n	RI	n	RI	n	RI
1	0	6	1.24	11	1.51
2	0	7	1.32	12	1.53
3	0.58	8	1.41	13	1.56
4	0.90	9	1.45	14	1.57
5	1.12	10	1.49	15	1.59

### 3.Aşama: Kriterlerin öncelik vektörünün hesaplanması

Kriterlerin önceliklerinin-ağırlıklarının belirlenmesi için özdeğer vektörü yöntemi, geometrik ortalama yöntemi gibi farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu uygulamada normalize edilmiş sütun toplamı yöntemi uygulanmıştır. Buna göre  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  olmak üzere öncelik vektörü **Denklem (5)** ile gösterildiği gibi hesaplanabilir [54].

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (5)$$

### 4.2 VIKOR

VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje-Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşık Çözüm) Serafim Opricovic ve Gwo-Hshung Tzeng tarafından birbiriyle çelişen ve farklı birimlerle gösterilen kriterlere sahip Çok Kriterli Karar Verme problemlerinin çözümü için geliştirilmiş bir yöntemdir. Yöntem uzlaşık çözümün bulunmasına dayanmaktadır. Bu çözüme ulaşabilmek için her bir kritere göre değerlendirilen her bir seçeneğin ideal seçeneğe yakınlıkları hesaplanır. Uzlaşık çözüm ideal çözüme en yakın (optimum) çözümdür ve uzlaşma, kriterler çerçevesinde ortak kabulü ifade eder [55]. VIKOR “çoğunluk” için maksimum “grup faydası” ve “rakip” için minimum bireysel pişmanlık sağlayan bir uzlaşma çözümü belirler [12].

VIKOR yöntemi

- Zıt görüşlerin olduğu fakat uzlaşmanın kabul edilebildiği,
- Karar vericilerin ideale en yakın alternatifi çözüm olarak kabul edebildikleri,

- Kriterler ile karar vericilerin faydaları arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu,
- Kriterlerin çelişkili, ölçeklendirilemeyen veya farklı birimlerde olduğu,
- Alternatiflerin belirlenen tüm kriterlere göre değerlendirilebilir olduğu,
- Karar vericinin kriterlere ağırlık vererek sisteme dahil olmak isteyebileceği

durumlarda kullanılabilen çok kriterli karar verme yöntemidir [56].

Bir karar matrisi ( $X$ ) **Denklem (6)**,  $A_1, \dots, A_m$  alternatifleri göstermek üzere üzere  $m$  alternatiften ve  $C_1, \dots, C_n$ , ile gösterilen  $n$  kriterden oluşmaktadır. Bu matrisin elemanları  $(x_{ij})_{m \times n}$  her bir alternatifin kriterlerin tamamına göre değerlendirilmesiyle elde edilen değerleri temsil eder.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (6)$$

Yöntemin algoritmik adımları şu şekilde listelenebilir.

1. Aşama: En iyi ( $f_j^*$ ) ve en kötü ( $f_j^-$ ) kriter değerlerinin belirlenmesi

$i = 1, 2, \dots, m$  ve  $j = 1, 2, \dots, n$  olmak üzere eğer  $j$ . kriter fayda yönlü bir kriter ise en iyi **Denklem (7)** ve en kötü kriter **Denklem (8)** değerleri sırasıyla

$$f_j^* = \max_i x_{ij} \quad (7)$$

$$f_j^- = \min_i x_{ij} \quad (8)$$

biçiminde bulunurken kriter maliyet yönlü ise bu değerler bu defa sırasıyla **Denklem (9)** ve **Denklem (10)** da gösterilmiştir.

$$f_j^* = \min_i x_{ij} \quad (9)$$

$$f_j^- = \max_i x_{ij} \quad (10)$$

2. Aşama:  $S_i$  ve  $R_i$  değerlerinin hesaplanması

$w_j$  değeri  $j$ . kriterin ağırlığı gösterir.  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$  olmak üzere  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri sırasıyla **Denklem (11)** ve **Denklem (12)** gösterildiği gibi hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j (f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-) \quad (11)$$

$$R_i = \max_j [w_j(f_j^* - f_{ij}) / (f_j^* - f_j^-)] \quad (12)$$

### 3. Aşama: $Q_i$ değerlerinin hesaplanması

Her alternatif için bir  $Q_i$  değerleri Denklem (13) de gösterildiği gibi bulunur.

$$Q_i = v \frac{(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - v) \frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (13)$$

Denklem (13) de yer alan  $S^*, S^-, R^*, R^-$  parametrelerinin hesaplanma yöntemleri Denklem (14-17) deki gibidir.

$$S^* = \min_i S_i \quad (14)$$

$$S^- = \max_i S_i \quad (15)$$

$$R^* = \min_i R_i \quad (16)$$

$$R^- = \max_i R_i \quad (17)$$

Denklem (13) de yer alan  $v$  parametresi maksimum grup faydasının olmasını sağlayan strateji için ağırlığı temsil ederken  $1 - v$  değeri ise karşıt görüş için minimum pişmanlık anlamına gelir. Uzlaşma “çoğunluk oyu” durumuyla ( $v > 0.5$ ), “konsensüs” durumuyla ( $v = 0.5$ ) veya “veto” durumuyla ( $v < 0.5$ ) sağlanır [56].

**1. Kabul Edilebilir Avantaj Koşulu:** En küçük  $Q$  değerine sahip alternatif  $A_1$ , daha sonraki en küçük  $Q$  değerine sahip alternatif  $A_2$  olsun. Eğer  $Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ$  şartı sağlanıyorsa bu koşul sağlanmış kabul edilir. Eşitsizlikte yer alan  $DQ$  değeri alternatif sayısına ( $m$ ) bağlı olup  $DQ = 1/(m - 1)$  şeklinde hesaplanır.

**2. Kabul Edilebilir İstikrar Koşulu:**  $Q$  değerlerine göre küçükten büyüğe yapılan sıralamada en küçük değere sahip olan  $A_1$  alternatifi,  $S$  ve  $R$  değerlerinin küçükten büyüğe doğru sıralamasında da ilk sırada yer alıyorsa bu durumda  $A_1$  en iyi alternatif olarak kabul edilir.

Bu iki koşuldan birinin geçerli olmadığı durumda ise uzlaşık çözümün elde edilebilmesi için şöyle bir yöntem izlenir.

- Kabul Edilebilir Avantaj koşulu sağlanıyorsa  $A_1, A_2 \dots A_m$  alternatiflerinden oluşan küme en iyi çözüm olarak kabul edilir. Maksimum  $m$  değeri için  $Q(A_m) - Q(A_1) < DQ$  eşitsizliği kullanılır.

- Kabul Edilebilir İstikrar koşulu sağlanmadığı durumda ise  $A_1$  ve  $A_2$  alternatiflerinin her ikisinin de uzlaşık çözüm kümesinde olduğu düşünülür.

## 5 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada, İstanbul ili sınırlarında ikamet etmek için konut satın almak isteyen bir bireyin konut seçimi problemi ele alınmıştır. Konut tercihi ve seçimi hakkında yapılan literatür araştırması ışığında ve tüketiciler, emlak

danışmanları ve en sık kullanılan emlak portalı olan sahibinden.com web portalından elde edilen kriterler göz önüne alınarak oluşturulan ÇKKV problemi seçim işlemi için çözümlenmiştir. Öncelikle, elde edilen kriterler AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmış ve VIKOR yöntemi kullanılarak alternatifler içerisinde seçim işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma amacı ve bilimsel yazın kısmında ifade edildiği gibi, İstanbul’ un deprem kuşağında yer alması ve deprem riski kriterinin de önemle dikkate alınması gereken bir ölçüt olması sebebiyle karar probleminde ek bir kriter olarak değerlendirmeye alınmıştır. Deprem riski kriterinin oluşturulması için Kümeleme Analizi kullanılarak İstanbul ili mahalleler bazında 3 ana risk grubuna ayrılmıştır. Yeni ölçütün konut tercihlerine etkisini araştırmak amacıyla risk ölçütü olmadan standart kriterler yardımıyla analiz gerçekleştirilmiş ve risk ölçütü dahil edilerek tekrar analiz uygulanmıştır. Ortaya çıkan iki seçim sonucunun istatistikî olarak ilişki gücünü test edebilmek amacıyla Ağırlıklandırılmış Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı hesaplanmıştır. Uygulamanın temel amacı, konut seçim sürecinde olan bir bireyin genel seçim kriterleri ile birlikte deprem riskine sahip bir yerleşim yerinde daha etkin ve rasyonel bir tercih yapabilesidir.

Problemin uygulama sürecinde öncelikle konut seçimi kriterleri, alternatifler ve geliştirilen yeni ölçüt için kullanılan İstanbul deprem riski verileri ifade edilecektir. Son aşamada ise Kümeleme Analizi, AHP ve VIKOR yöntemlerinden elde edilen bulgular eşliğinde en uygun konut seçimi sıralaması sunulacaktır.

### 5.1 Veri seti

Çalışmada kullanılan karar kriterleri ve kıyaslama matrisi oluşturulurken İstanbul ili sınırlarında ikamet etmek isteyen bireylerden, emlak danışmanlarından, literatür taraması sonuçlarından ve emlak portallarından elde edilen bilgilerden faydalanılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda 13 kriter belirlenmiştir. Ek olarak deprem riski kriteri dahil edilmiştir. AHP yöntemi kullanılarak elde edilen veriler ışığında kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır.

Öncelikle fiyat, kullanım alanı, oda sayısı, bina yaşı, bulunduğu kat, ısıtma türü, krediye uygunluk, kimden, görüntülü arama ile gezilebilirlik, cephe, güvenlik sistemi, muhit ve ulaşım olmak üzere toplam 13 kriter AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Aynı kriterlere ek olarak “deprem riski” kriteri dâhil edilip AHP yöntemi ile ağırlıkların hesaplanması yeniden yapılmıştır. Deprem riski kriterinin emlak sektörü ve bilimsel yazında genel kabul görmüş konut seçimi kriterlerine ek olarak dâhil edilmesiyle alternatif konutlar içerisinde yapılacak tercihlerde ve sıralamada meydana getireceği etkinin ölçülmesi amaçlanmıştır.

Tablo 4 ve Tablo 5 karar kriterlerini ve AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıklarını içermektedir.

Konut seçimi alternatifleri 2020 yılı verilerine göre İstanbul ili sınırlarında en çok göç alan [15] ilk beş ilçe (Arnavutköy, Beylikdüzü, Çekmeköy, Sancaktepe, Silivri) içerisinde sahibinden.com web portalından 3’er adet konut olarak belirlenmiştir Tablo (6).



**Tablo 4.** Karar kriterleri ve ağırlıkları-A.

Kriter No	Kriterler	(AHP)Ağırlık
K-1	Fiyat	0.30
K-2	Kullanım alanı	0.10
K-3	Oda sayısı	0.07
K-4	Bina yaşı	0.08
K-5	Bulunduğu kat	0.05
K-6	Isıtma türü	0.02
K-7	Krediye uygunluk	0.07
K-8	Kimden	0.01
K-9	Görüntülü gezilebilir	0.04
K-10	Cephe	0.03
K-11	Güvenlik sistemi	0.05
K-12	Muhit	0.07
K-13	Ulaşım	0.11

**Tablo 5.** Karar kriterleri ve ağırlıkları-B.

Kriter No	Kriterler	(AHP) Ağırlık
K-1	Fiyat	0.25
K-2	Kullanım alanı	0.10
K-3	Oda sayısı	0.05
K-4	Bina yaşı	0.08
K-5	Bulunduğu kat	0.03
K-6	Isıtma türü	0.02
K-7	Krediye uygunluk	0.03
K-8	Kimden	0.01
K-9	Görüntülü gezilebilir	0.02
K-10	Cephe	0.01
K-11	Güvenlik sistemi	0.05
K-12	Muhit	0.05
K-13	Ulaşım	0.11
K-14	Deprem riski	0.19

Emlak danışmanlarından elde edilen bilgiye göre, alternatif konut araması yapılırken orta gelirli bir ailenin konut harcaması için ortalama olarak 300.000 TL - 400.000 TL arasında bütçeye sahip oldukları varsayılmıştır. Web sitesi üzerinde kriterler için sunulan alt seçim ölçütleri ve özellikler için emlak danışmanlarından mülakat yoluyla değerlendirme skorları belirlenmiştir. Skor değerleri maksimum / minimum ya da 1-100 üzerinden verilen değerlendirme puanı olacak şekilde planlanmıştır. Buna göre;

*K-1 (Fiyat):* Fiyat minimum düzeyde istenecektir.

*K-2 (Kullanım alanı):* Net kullanım metrekare alanı maksimum düzeyde istenecektir.

*K-3 (Oda sayısı):* Toplam oda sayısının maksimum düzeyde olması istenecektir.

*K-4 (Bina yaşı):* Konutun yer aldığı binanın yaşı minimum düzeyde istenecektir.

*K-5 (Bulunduğu kat):* Bölgelerde bulunan binaların ortalama olarak 5 katlı olduğu varsayılarak belirlenmiştir. Buna göre; zemin kat: 10/100, bahçe kat: 10/100, giriş kat: 15/100, yüksek giriş: 20/100, kat1: 30/100, kat2: 60/100, kat3: 90/100, kat4: 85/100, kat5: 80/100.

*K-6 (Isıtma türü):* En sık tercih edilen ısıtma türleri; Merkezi pay ölçer: 70/100, doğalgaz kombi: 90/100

*K-7 (Krediye uygunluk):* Krediye uygun: 100/100, krediye uygun değil: 20/100.

*K-8 (Kimden):* Sahibinden: 100/100, emlak ofisinden: 60/100, inşaat firmasından: 70/100.

*K-9 (Görüntülü arama ile gezilebilir):* Evet: 85/100, Hayır: 60/100.

*K-10 (Cephe):* Kuzey:50/100, Güney:90/100, Doğu: 70/100, Batı: 70/100.

*K-11 (Güvenlik sistemi):* Güvenlik sistemi var: 90/100, güvenlik sistemi yok: 50/100 şeklinde puanlanmıştır.

*K-12 (Muhit):* Site üzerinde muhit kriterinde yer alan 22 adet alt seçenektan kaçının sağlandığına göre yüzdelik değeri kullanılmıştır. Bu değer maksimum miktarda özelliğe sahip olması istenecektir.

*K-13 (Ulaşım):* Site üzerinde ulaşım kriterinde yer alan 20 adet alt seçenektan kaçının sağlandığına göre hesaplanan yüzdelik değer kullanılmıştır. Bu değer de maksimum olması amaçlanmaktadır.

*K-14 (Deprem riski):* İstanbul ili sınırlarında yer alan 969 mahalle 3 ana risk kümesine bölünmüştür. En az riske sahip küme 1, orta riske sahip küme 2 ve en yüksek risk kümesi 3 olarak belirlenmiştir. 1.risk kümesi: 90/100, 2. risk kümesi: 60/100, 3. risk kümesi: 30/100 olarak puanlanmıştır.

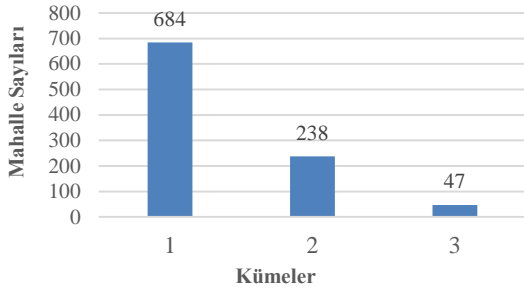
## 5.2 Kümeleme analizi ile deprem riski kriterinin elde edilmesi

Çalışmada kullanılan deprem riski kriteri için İBB DEZİM tarafından hazırlanan rapor içerisinde yer alan mahalle bazlı elde edilmiş risk değerleri Kümeleme Analizi ile 3 risk kümesine ayrılmış ve konut seçimi kriteri olarak uygulamaya dâhil edilmiştir. **Tablo 7** kümelerin merkezlerini göstermektedir.

**Tablo 7.** Küme merkezleri

Değişken	Küme-1	Küme-2	Küme-3
Çok Ağır Hasarlı	-0.4328	0.6698	2.7884
Ağır Hasarlı	-0.4089	0.7501	2.0641
Orta Hasarlı	-0.4511	0.7498	2.6558
Can Kaybı Sayısı	-0.4031	0.5398	3.0043
Ağır Yaralı Sayısı	-0.4068	0.5483	3.0159
Doğalgaz Borusu Hasarı	-0.4399	0.7890	2.3092
İçme Suyu Borusu Hasarı	-0.4342	0.7686	2.3275
Atık Su Boru Hasarı	-0.4162	0.6168	2.8137

**Şekil 1'** de her bir kümede yer alan mahalle sayısı görülmektedir. Küme-1 en az riske sahip, Küme-2 orta riske sahip, Küme-3 ise en yüksek riskli mahalleleri temsil etmektedir.



Şekil 1. Kümelerdeki mahalle sayıları.

### 5.3 VIKOR yöntemi ile alternatiflerin sıralanması

Çalışmanın bu bölümünde veri seti kısmında A ve B şeklinde iki farklı şekilde tanımlanmış seçim kriteri grubu için VIKOR yöntemi ile alternatifler sıralanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Seçim-B, deprem riski kriteri dahil edilerek yeniden değerlendirme yapabilmek amacıyla uygulanmıştır.

Seçim – A.

1. Aşama: En iyi ( $f_j^+$ ) ve en kötü ( $f_j^-$ ) kriter değerlerinin belirlenmesi

Tablo 4'te yer alan kriterlerin alternatif değerleri üzerinden uygulanan VIKOR yöntemi sonucunda elde edilen en iyi ve en kötü değerleri Tablo 8' de verilmiştir.

Tablo 8. Kriterlerin en iyi ve en kötü değerleri

	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6	K-7
$f^+$	350000	100	5	0	90	90	100
$f^-$	380000	80	2	13	10	70	20
	K-8	K-9	K-10	K-11	K-12	K-13	
$f^+$	100	85	95	90	90	80	
$f^-$	60	60	50	50	25	20	

### 2. Aşama: $S_i$ ve $R_i$ değerlerinin hesaplanması

VIKOR algoritmasına göre alternatifler için  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 9.  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
S	0.595	0.457	0.461	0.227	0.296
R	0.11	0.101	0.150	0.050	0.100
	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10
S	0.459	0.648	0.482	0.410	0.416
R	0.200	0.300	0.150	0.073	0.150
	A-11	A-12	A-13	A-14	A-15
S	0.562	0.536	0.441	0.484	0.520
R	0.200	0.250	0.100	0.250	0.300

### 3. Aşama: $Q_i$ değerlerinin hesaplanması

Alternatiflerin sıralaması için kullanılacak  $Q_i$  değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 10. Alternatiflerin  $Q_i$  değerleri

A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
0.581	0.388	0.484	0.000	0.181
A-6	A-7	A-8	A-9	A-10
0.574	1.000	0.511	0.277	0.426
A-11	A-12	A-13	A-14	A-15
0.705	0.764	0.366	0.698	0.836

Hesaplanan S, R ve sonucunda elde edilen Q değerlerine göre, en küçük Q değerine sahip olan alternatif en iyi alternatif olacaktır için 4. alternatif en iyi ve sırasıyla 5. ve 9. alternatifler ise ikinci ve üçüncü en iyi seçenekler olacaktır. En kötü alternatif ise 7. alternatif olacaktır.

### 4. Aşama: Uzlaşık çözümün bulunması

Bulunan sonuçların tutarlılığının değerlendirilebilmesi için uzlaşık çözümün elde edilmesi gerekecektir. Koşul 1 için;  $Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ$  şartı sağlanıyor ise koşul sağlanmış olacaktır. Alternatif sayısı 15 olduğu için  $m=15$  alınacaktır ve  $DQ=1/(m-1)= 0.071$  olacaktır. Buna göre,  $0.181 - 0 \geq 0.071$  şartı sağlandığı için koşul sağlanmıştır. Koşul 2 için; Q değerine göre en iyi alternatif kabul edilen 4. alternatifin S ve R değerleri içinde ilk sırada bulunması gerekecektir. 4. alternatif için  $S=0.227$  ve  $R=0.050$  değerlerine bakıldığında şartı sağlandığı anlaşılmaktadır. Bu durumda Seçim-A için gerçekleştirilen çözümleme uygun kabul edilmiştir.

### Seçim – B.

1. Aşama: En iyi ( $f_j^+$ ) ve en kötü ( $f_j^-$ ) kriter değerlerinin belirlenmesi

Tablo 5'te yer alan kriterlerin alternatif değerleri üzerinden uygulanan VIKOR yöntemi sonucunda elde edilen en iyi ve en kötü değerleri Tablo 11' de verilmiştir.

Tablo 11. Kriterlerin en iyi ve en kötü değerleri

	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6	K-7
$f^+$	350000	100	5	0	90	90	100
$f^-$	380000	80	2	13	10	70	20
	K-8	K-9	K-10	K-11	K-12	K-13	K-14
$f^+$	100	85	95	90	90	80	90
$f^-$	60	60	50	50	25	20	30

### 2. Aşama: $S_i$ ve $R_i$ değerlerinin hesaplanması

VIKOR algoritmasına göre alternatifler için  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri hesaplanmıştır.

### 3. Aşama: $Q_i$ değerlerinin hesaplanması

Alternatifler için elde edilen  $S_i$  ve  $R_i$  değerleri ile alternatif sıralaması için kullanılacak  $Q_i$  değerleri hesaplanmıştır.

Hesaplanan S, R ve bunların sonucunda elde edilen Q değerlerine göre, en küçük Q değerine sahip olan alternatif en iyi alternatif olacaktır için 9. alternatif en iyi ve sırasıyla 10. ve 2. alternatifler ise ikinci ve üçüncü en iyi seçenekler olacaktır. En kötü alternatif ise 7. alternatif olacaktır.

### 4. Aşama: Uzlaşık çözümün bulunması

**Tablo 12.** S<sub>i</sub> ve R<sub>i</sub> değerleri

	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
S	0.505	0.383	0.391	0.365	0.432
R	0.110	0.101	0.125	0.190	0.190
	A-6	A-7	A-8	A-9	A-10
S	0.560	0.526	0.375	0.336	0.354
R	0.190	0.250	0.125	0.073	0.125
	A-11	A-12	A-13	A-14	A-15
S	0.454	0.444	0.392	0.520	0.530
R	0.167	0.208	0.100	0.208	0.250

Bulunan sonuçların tutarlılığının değerlendirilebilmesi için uzlaşık çözümün elde edilmesi gerekecektir. Koşul 1 için;  $Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ$  şartı sağlanıyor ise koşul sağlanmış olacaktır. Alternatif sayısı 15 olduğu için  $m=15$  alınacaktır ve  $DQ=1/(m-1) = 0.071$  olacaktır. Buna göre,  $0.179 - 0 \geq 0.071$  şartı sağlandığı için koşul sağlanmıştır.

Koşul 2 için; Q değerine göre en iyi alternatif kabul edilen 9. alternatifin S ve R değerleri içinde ilk sırada bulunması gerekecektir. 9. alternatif için  $S=0.336$  ve  $R=0.073$  değerlerine bakıldığında şartı sağlandığı anlaşılmaktadır. Bu durumda Seçim-B için gerçekleştirilen çözümleme uygun kabul edilmiştir.

**Tablo 13.** Alternatiflerin Q<sub>i</sub> değerleri.

A-1	A-2	A-3	A-4	A-5
0.501	0.186	0.268	0.376	0.536
A-6	A-7	A-8	A-9	A-10
0.843	0.919	0.230	0.000	0.179
A-11	A-12	A-13	A-14	A-15
0.529	0.612	0.205	0.794	0.928

#### 5.4 Seçimlerin değerlendirilmesi

Tablo 14' te her iki seçimin karşılaştırmalı alternatif sıralamasına yer verilmiştir.

Bu aşamada ortaya çıkan iki seçim sonucunun karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla Ağırlıklandırılmış Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı hesaplanmıştır.

N alternatifin yer aldığı ve sıralamaların  $x_i$  ve  $y_i$  ile gösterildiği durum için ağırlıklandırılmış Spearman Sıralama korelasyon katsayısı ( $r_w$ ) Denklem (18) gibi hesaplanır [57].

$$r_w = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 ((N - x_i + 1) + (N - y_i + 1))}{N^4 + N^3 - N^2 - N} \quad (18)$$

Buna göre; korelasyon katsayısı  $r_w = 0.633$  elde edilmiştir. %63 korelasyon değeri düşük seviyeye yakın bir ilişkinin olduğunu ifade etmektedir.

**Tablo 14.** Karşılaştırmalı seçim sonuçları

Alternatif	Seçim A	Seçim-B
A-1	10	8
A-2	5	3
A-3	7	6
A-4	1	7
A-5	2	10
A-6	9	13
A-7	15	14
A-8	8	5
A-9	3	1
A-10	6	2
A-11	12	9
A-12	13	11
A-13	4	4
A-14	11	12
A-15	14	15

## 6 Sonuçlar

Risk, bireysel ve toplumsal olarak hayatın her anında ve alanında karşı karşıya kaldığımız belirsizlikler bütünüdür. Konut satın alma sürecinde karar vericilerin yapacakları seçimler çoğu zaman karmaşık ölçütler ve birden fazla alternatif seçenек üzerinden yapılacak ÇKKV problemine dönüşmektedir. Konut seçimi hakkında genel görüş ve bilimsel yazın dikkate alındığında, alternatiflerin sahip oldukları risklerin göz ardı edildiği görülmektedir. Ancak İstanbul ili gibi olası deprem riskine sahip bir bölgede konut tercihi yapacak karar vericiler için konutların deprem riskli bölgelerde yer almaları önemli bir ölçüt olacaktır.

Bu çalışma, İstanbul ili sınırlarında ikamet etmek isteyen bir bireyin konut seçimi problemini risk tabanlı bir yaklaşım ile ele almıştır. Bilimsel yazın, uzman görüşleri ve ilgili kurumlardan elde edilen veriler ışığında elde edilen 13 seçim kriteri, emlak danışmanları ve tüketicilerden mülakat yoluyla alınan önem ölçeğine uygun olarak puanlanarak AHP yöntemi ile ağırlıkları belirlenmiştir. Buna göre, %30 ile konut fiyatı en önemli kriter olurken, %11 ile ulaşım ve %10 ile kullanım alanı önem ağırlığında bu kriteri takip etmiştir. Belirlenen 13 kritere ek olarak deprem riski kriteri eklenmiş ve aynı karar vericilerden mülakat yoluyla ulaşılan bilgiler ışığında AHP yöntemi ile önem ağırlıkları belirlenmiştir. Buna göre, fiyat %25 ile yine en yüksek öneme sahip olurken, %19 ile deprem riski kriteri ikinci sırada yer almıştır. Karar vericilerin deprem riski kriterine diğer kriterlere kıyasla büyük bir öncelik verdikleri gözlenmiştir.

Her iki seçim kriteri grubu için İstanbul ilinde en çok göç alan ilk beş ilçeden sahibinden.com portalı üzerinden belirlenmiş fiyat aralığında rastgele seçilmiş toplam 15 alternatif için sıralama işlemi VIKOR yöntemi ile sağlanmıştır. İlk seçim işleminde A-4, A-5 ve A-9 numaralı alternatifler ilk üç sırada yer alırken, ikinci seçim işleminde A-9, A-10 ve A-2 numaralı alternatifler sıralanmıştır. Deprem riski kriteri dikkate alınmadan yapılan ilk seçimde 3. sırada yer alan alternatifin ikinci seçimde 1. sırada yer alması gibi, genel sıralamanın büyük ölçüde değişmesi, risk tabanlı bir yaklaşım ile karar vericilerin aynı alternatifler için kararlarını büyük oranda etkilediğini göstermiştir. Her iki seçimin alternatiflere göre karşılaştırılması amacıyla elde edilen korelasyon katsayısı değerine göre düşük

sayılabilecek % 63 değerine ulaşılmıştır. Bu değer her iki seçim arasında yüksek bir benzerliğin olmadığını, yani deprem riski kriterinin alternatiflerin seçiminde farklılık meydana getirdiğini kanıtlamaktadır.

Uygulama, konutun fiziksel sağlamlığı kriteri ile kullanılan malzeme ve yapım tekniği gibi özellikler dikkate alınarak ve farklı yöntemler kullanılarak geliştirilebilir. Çalışma, toplumsal ve güncel bir problem olan konut seçimini farklı bir bakış açısı ile ele alarak, karar vericilere ve bilimsel çalışmalara katkı sağlamak amacı taşımaktadır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): % 16**

#### Kaynaklar

- [1] Ç. İpek, Y. Şahin, AHP temelli gri ilişkisel analiz yöntemi ile konut seçimi, Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi, 9(25), 153-172, 2018.
- [2] E. Mulliner, K. Smallbone, V. Maliene, An assessment of sustainable housing affordability using a multiple criteria decision making method, Omega, 41(2), 270-279, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.05.002>
- [3] T. Alkan ve S. Durduran, Konut seçimi sürecinin ahp temelli topsis yöntemi ile analizi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2(2), 12-21, 2020. <https://dx.doi.org/10.47112/neufmbd.2020.2>
- [4] İ. Karaduman ve N. K. Yılmaz, Rezidans dairesi satışında müşteri tercihlerini etkileyen faktörler ve pazar payı analizinde konjoint yönteminin kullanımı, Giresun Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 1(2), 65-82, 2015.
- [5] K. M. G. Wong, A conceptual model of the household's housing decision-making process: the economic perspective, Rurds, 14(3), 217-234, 2003. <https://doi.org/10.1111/1467-940X.00055>
- [6] H. Timmermans, E. Molin, L. V. Noortwijk, Housing choice processes: stated versus revealed modelling approaches, Netherlands Journal of Housing and the Built Environment, 9(3), 215-227, 1994. <https://doi.org/10.1007/BF02496997>
- [7] O. Ergünay, Türkiye'nin afet profili. TMMOB Afet Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 5-7 Aralık 2007.
- [8] A. Supçiller ve P. Erbilek, Analitik hiyerarşi prosesi ve hedef programlama ile bir üniversite kütüphanesindeki kısmi zamanlı personellerin çizelgelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(1), 1-12, 2021. <https://doi.org/10.5505/pajes.2020.86383>
- [9] L. Ferreira and D. B. Hitchcock, A comparison of hierarchical methods for cluster functional data, Communications in Statistics-Simulation and Computation, 38(9), 1925-1949, 2009. <https://doi.org/10.1080/03610910903168603>
- [10] G. A. Mendoza and R. Prabhu, Multiple criteria decision making approaches to assessing forest sustainability using criteria and indicators: A case Study, Forest Ecology and Management, 131(1-3), 107-126, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00204-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00204-2)
- [11] T.L. Saaty, The analytic Hierarchy Process. New York, USA, McGraw-Hill, 1980.
- [12] S. Opricovic and G.H. Tzeng, Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS, European Journal of Operational Research, 156(2), 445-455, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- [13] M.K. Sayadi, M. Heydari, K. Shahanaghi, Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers, Applied Mathematical Modelling, 33(5), 2257-2262, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.06.002>
- [14] İBB Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı, Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü (DEZİM). İstanbul İli Olası Deprem Kayıp Tahminleri Kitapçığı. <https://deprezmemin.ibb.istanbul/guncelcalismalarimiz/> (21 Ocak 2021)
- [15] Türkiye İstatistik Kurumu, Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, İl ve İlçelere Göre İl/İlçe Merkezi, Belde/Köy Nüfusu ve Yıllık Nüfus Artış Hızı. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuc-lari-2020-37210> (13.04.2021)
- [16] S. Memiş, Tüketicilerin konut tercihini etkileyen faktörlerinin Ahp ile ölçülmesi: Giresun ili örneği. Avrasya Uluslararası Araştırmalar Dergisi, 7(16), 783-796, 2019. <https://doi.org/10.33692/avrasyad.543867>
- [17] R. F. Muth, Cities and Housing: The Spatial Pattern of Urban Residential Land Use, USA, Chicago and London: The University of Chicago Press, 1969.
- [18] W. Alonso, Location and Land Use. Cambridge, Massachusetts, USA, Harvard University Press, 1964.
- [19] I.S. Lowry, A Model of Metropolis, USA, Santa Monica: Rand Corporation, 1964.
- [20] P.H. Rossi, Why Families Move: A Study in the Social Psychology of Urban Residential Mobility, USA, New York: The Free Press, 1955.
- [21] A. Eş ve B. Yılmaz, Kiralık konut seçiminin AHP tabanlı Vikor yöntemiyle belirlenmesi: Çankaya örneği, Atatürk Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 34(4), 1229-1249, 2020. <https://doi.org/10.16951/atauniiib.650809>
- [22] F. Kendig, Will a Home Still Be a House. Institutional Investor, 16, 89-91, 1982.
- [23] R. K. Trembley and A. D. Dillman, Beyond the American Housing Dream: Accommodation to the 1980s, Housing and Society, USA, Lanham, University Press of America, 1983.
- [24] H. B. Kang and M. J. Gardner, Selling Price and Marketing Time in the Residential Real Estate Market, Journal of Real Estate Research, 4(1), 21-35, 1989. <https://www.jstor.org/stable/44095260>
- [25] W.A.V Clark and J.L. Onaka, Life Cycle and Housing Adjustment as Explanations of Residential Mobility,



- Urban Studies, 20(1), 47-57, 1983. <https://doi.org/10.1080/713703176>
- [26] Y. Jin and Z. Zeng, Real Estate and Optimal Public Policy in a Credit-Constrained Economy, Journal of Housing Economics, 16(2), 143-166, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhe.2007.03.003>
- [27] L.M. Fisher, H.O. Pollakowski and J. Zabel, Amenity-Based Housing Affordability Indexes, Real Estate Economics, 37(4), 705-746, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6229.2009.00261.x>
- [28] E. Kaba, Konut Alma Kararlarını Etkileyen Faktörler ve Alıcı Profilini Belirlemeye Yönelik Bir Araştırma. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [29] R. A. Opoku and A. G. Abdul-Muhmin, Housing preferences and attribute importance among low-income consumers in Saudi Arabia, Habitat International, 34(2), 219-227, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2009.09.006>
- [30] K. E. Tosun ve Z. Fırat, Kentsel Mekândaki Değişimler ve Kişilerin Konut Tercihleri: Bursa Örneği. Business and Economics Research Journal, 3(1), 173-195, 2012.
- [31] M. R. Kalelioğlu ve E. M. Özgür, İkametgâh Memnuniyeti Bağlamında Konut Yeri Seçimi ve İkametgâh Hareketliliği: Bolu Kenti Örneği, Coğrafi Bilimler Dergisi, 11(2), 149-168, 2013. [https://doi.org/10.1501/Cogbil\\_0000000147](https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000147)
- [32] TL. Saaty, How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operations Research, 48(1), 9-26, 1989. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- [33] J Ball and V.C. Srinivasan, Using the analytic hierarchy process in house selection, The Journal of Real Estate Finance and Economics, 9(1), 69-85, 1994. <https://doi.org/10.1142/S0219622009003314>
- [34] M.J. Schniederjans, J.J. Hoffman, G.S. Sirmans, Using goal programming and the analytic hierarchy process in house selection, The Journal of Real Estate Finance and Economics, 11(2), 167-176, 1995. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2007.4413642>
- [35] A. Bender, A. Din, M. Hoesli, J. Laakso, Environmental quality perceptions of urban commercial real estate, Journal of Property Investment and Finance, 17(3), 280-297, 1999. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.198>
- [36] T. Kauko, An Analysis Of Housing Location Attributes In The Inner City Of Budapest, Hungary, Using Expert Judgements. International Journal Of Strategic Property Management, 11(4), 209-225, 2007. <https://doi.org/10.3846/1648715X.2007.9637570>
- [37] M. Timor, Analitik Hiyerarşi Prosesi, İstanbul, Türkiye, Türkmen Kitabevi, 2011.
- [38] B. F. Yıldırım, Gri İlişkisel Analiz. Editörler: B. F. Yıldırım, E. Önder. İşletmeciler, Mühendisler ve Yöneticiler İçin Operasyonel, Yönetimsel ve Stratejik Problemlerin Çözümünde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, 230-244, Türkiye, Bursa, Dora Yayınları, 2. Baskı, 2014.
- [39] A. Onan, Promethee Sıralama Yönteminin Konut Projelerinin Değerlendirilmesinde Kullanılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 16 (1) , 17-28, 2014. <https://doi.org/10.5578/jeas.6470>
- [40] Á. Sicilia, L. Madrazo, M. González, Applying clustering techniques to retrieve housing units from a repository, In Design Computing and Cognition'10 (pp. 387-401). Springer, Dordrecht, 2011. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0510-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0510-4_21)
- [41] M. Helbich, W. Brunauer, J. Hagenauer, M. Leitner, Data-driven regionalization of housing markets, Annals of the Association of American Geographers, 103(4), 871-889, 2013. <https://doi.org/10.1080/00045608.2012.707587>
- [42] L. Gabrielli, S. Giuffrida, M. R. Trovato, Gaps and overlaps of urban housing sub-market: hard clustering and fuzzy clustering approaches. In Appraisal: From theory to practice (pp. 203-219), Springer, Cham., 2017. <https://doi.org/10.3390/buildings7030080>
- [43] C. Çelik ve G. Kırıl, Kümeleme Yöntemiyle Konut Talebinin İncelenmesi: Türkiye İl Grupları Üzerine Bir Uygulama, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 27(1), 123-138., 2018. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cusosbil/issue/36563/415459>
- [44] S. Ara-Aksoy and E. Irwin, Cluster Analysis for Housing Market Segmentation: Konut Piyasası Bölümlendirmesinde Kümelenme Analizi, Sosyoekonomi, 29(49), 11-32.,2021. <https://doi.org/10.17233/sosyoekonomi.2021.03.01>
- [45] Ö. Akay, C. Çelik, G. Kırıl, Using Clustering of Panel Data to Examine Housing Demand of Expatriate Turks and Foreigners: An Application of k-prototype Algorithm, In Application of Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental and Civil Engineering (pp. 183-195). Springer, Cham., 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64765-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64765-0_18)
- [46] L. Zhang and X. Hu, Public Housing Allocation Model in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under Clustering Algorithm, Complexity, 6, 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/7582502>
- [47] R. Alpar, Çok Değişkenli İstatistik Yöntemler, 4. Baskı, Ankara, Türkiye, Detay Yayıncılık,2013.
- [48] H. Akpınar, Data Veri Madenciliği Veri Analizi, 2.Baskı, İstanbul, Türkiye, Papatya Yayıncılık, 2017.
- [49] G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani, An introduction to statistical learning: with applications in R, New York, Springer,2013.
- [50] İ. Arslan, Python ile Veri Bilimi, 3.Baskı, İstanbul, Pusula Yayıncılık, 2020.
- [51] H. Bulut, R Uygulamaları ile Çok Değişkenli İstatistiksel Yöntemler, 1. Baskı, Ankara, Türkiye, Nobel Yayıncılık, 2018.
- [52] M. Timor, Yöneylem Araştırması ve İşletmecilik Uygulamaları, 1.Baskı, İstanbul, İ.Ü Basımevi Müdürlüğü, 2001.

- [53] T. Paksoy, N. Yapıcı Pehlivan, E. Özceylan, Bulanık Küme Teorisi.1.Baskı, Ankara, Nobel Akademik Yayıncılık,2013.
- [54] J. Papathanasiou and N. Ploskas, Multiple Criteria Decision Aid Methods, Examples and Python Implementations, Birinci Baskı, Springer, 2018.
- [55] A. Özbek, Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ve Excel ile Problem Çözümü, İkinci Baskı, Ankara, Seçkin Yayınları, 2019.
- [56] E. Ayçin, Çok Kriterli Karar Verme Bilgisayar Uygulamalı Çözümler, İkinci Basım, Ankara, Nobel Yayıncılık, 2020.
- [57] B. Kizielewicz, A. Baczkiewicz, Comparison of Fuzzy TOPSIS, Fuzzy VIKOR, Fuzzy WASPAS and Fuzzy MMOORA methods in the housing selection problem, Procedia Computer Science, 192, 4578-4591, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.236>.





## A study on strategy development for e-commerce businesses with clustering and spherical fuzzy analytic hierarchy process

### Kümeleme ve küresel bulanık analitik hiyerarşi süreci ile e-ticaret işletmeleri için strateji geliştirme üzerine bir çalışma

Serap Tepe <sup>1,\*</sup> , Serkan Eti <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> University of Health Sciences, Department of Occupational Health and Safety

<sup>2</sup> Istanbul Medipol University, Department of Computer Programming

#### Abstract

E-Commerce is a shopping method that allows trading or placing an order for any product or service on a website with various payment methods. This method is gaining importance day by day and increasing its market share. Although the reasons for choosing e-commerce for consumers are different from each other, in general, criteria such as time, payment options and individualization affect preferences. In this study; e-commerce sites were compared, and 14 e-commerce sites were determined as alternatives based on expert opinions. These identified e-commerce sites were evaluated in terms of criteria such as brand image & reliability, campaign, cargo speed, packaging, payment options, personnel, call center services and functionality of the application. In the first part of the study, two clusters of e-commerce sites were created using cluster analysis. These clusters are grouped as general service e-commerce sites and specific service e-commerce sites. Thus, two homogeneous groups were formed from the large heterogeneous group. In the second part of the study, the criteria were compared and sorted using the spherical fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP) method.

**Keywords:** E-commerce, Clustering, Analytical hierarchy process, Fuzzy logic

#### 1 Introduction

Meeting human needs is the main principle of all economic activities. People need various products and services to survive. While meeting these needs was called trade in the beginning, the line between the concept of need and the concept of desire began to disappear with the change of time and conditions, and two driving forces, one innate and the other learned later, have shaped today's demand concept and allowed it to spread to all areas of life. The reason for the emergence of trade is the desire of man to meet his needs. Due to the limited production and resources, people wanted to provide the product or service that they did not have from someone else, and for this reason, they chose

#### Öz

E-Ticaret, bir web sitesindeki herhangi bir ürün veya hizmet için çeşitli ödeme yöntemleriyle alım satım yapılmasına veya sipariş verilmesine olanak sağlayan bir alışveriş yöntemidir. Bu yöntem her geçen gün önem kazanmakta ve pazar payını arttırmaktadır. Tüketicilerin e-ticareti tercih etme nedenleri birbirinden farklı olsa da genel olarak zaman, ödeme seçenekleri ve bireyselleşme gibi kriterler tercihleri etkilemektedir. Bu çalışmada; e-ticaret siteleri karşılaştırılmış ve uzman görüşleri doğrultusunda alternatif olarak 14 e-ticaret sitesi belirlenmiştir. Belirlenen bu e-ticaret siteleri marka imajı ve güvenilirliği, kampanya, kargo hızı, paketleme, ödeme seçenekleri, personel, çağrı merkezi hizmetleri ve uygulamanın işlevselliği gibi kriterler açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, küme analizi kullanılarak iki e-ticaret sitesi kümesi oluşturulmuştur. Bu kümeler genel hizmet e-ticaret siteleri ve özel hizmet e-ticaret siteleri olarak gruplandırılmıştır. Böylece büyük heterojen gruptan iki homojen grup oluşturulmuştur. Çalışmanın ikinci bölümünde ise, küresel bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılarak kriterler karşılaştırılmış ve sıralanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** E-ticaret, Kümeleme, Analitik hiyerarşi süreci, Bulanık mantık

to change with the product or service that they have. Over time, the needs have diversified and the feeling of not being satisfied with less has been added to this diversity and different meanings have been given to trade. Today, people can trade in both physical and virtual environments; In this way, they have the opportunity to choose from unlimited products and services. Both types of shopping offer different experiences to consumers and work to best respond to customer demand. Physical shopping is a type of shopping that has existed since the first times of commerce and responds to the expectations of the consumer such as touching the product to be purchased and experiencing the

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: serap.tepe@sbu.edu.tr (S. Tepe)

Geliş / Recieved: 22.12.2021 Kabul / Accepted: 21.03.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1040138

product. Although its uncertainties are relatively less than online shopping, it leaves its place to internet shopping in many areas day by day. Today, consumers prefer online shopping for reasons such as limited time, traffic, parking problem, avoiding crowded environments. The fact that e-commerce offers consumers the opportunity to compare the features and prices of products, the presence of customer reviews and personalized services support shopping in the virtual environment. Thanks to internet shopping, consumers can quickly access all the information about the product they want and make comparisons between similar products. Consumers who work hard and do not want to spend their limited holiday opportunities on shopping, who pay more attention not to be in crowded environments with the pandemic period, and who prefer e-shopping due to many different criteria, cause this market to grow and develop itself. E-shopping systems are updating themselves day by day, expanding their product range and reaching consumers from all channels. As a result of this close relationship with the consumer, the time spent on e-commerce sites increases and the boundaries between wants and needs become unclear. During e-shopping, consumers are no longer just looking for the product; They pay attention to the delivery time, payment options, cargo speed and even the cargo company they work with. This situation causes e-shopping sites to carry out different studies in order to increase their service quality and to be preferred more.

There are different definitions used in the literature for e-commerce. According to the Organization for Economic Development and Cooperation, e-commerce is the buying and selling of goods or services over computer networks [1]. E-commerce is also defined as the transfer of commercial activities from the traditional way to electronic order, supply and distribution channels [2]. Today, with the spread of e-commerce, the speed factor has gained importance in issues such as time, information, ordering, procurement,

comparison and stock. In order to meet customer expectations and create customer loyalty, e-commerce sites are updated in both management and process activities. According to some researchers, the birth of e-commerce is called the 1990s, while others think that e-commerce is as old as electronic data interchange (EDI). In this context, the earliest examples of e-commerce were seen in the 1960s with the development of electronic data exchange (EDI) for exchanging business documents from one computer to another in a standardized format. This is the first generation of e-commerce or EDI, allowing companies to securely and efficiently exchange information, place orders and electronic money transfers from computers provided the opportunity [3]. The emergence of the Internet in the 1990s, with the processing of goods and services over the Internet ushered in the second era of e-commerce [4]. Today, when it comes to e-commerce, it is not just the sale of a product in electronic environment; different elements such as digital advertising and marketing tactics, social media management, content creation, customer relationship management, warehouse, stock, cargo process management, search engine optimization, but which are chains of the same ring and make e-commerce e-commerce are discussed. The priority of e-commerce is to provide consumers with fast and easy shopping opportunities. It is among the priorities of e-commerce that products and services can be delivered quickly to the consumer, shopping can be done easily without tiring the user, providing a high level of security for the purchasing processes and being open to change. According to the forms of e-commerce; It is classified in 5 units: from business to business, from business to consumer, from consumer to consumer, from business to public administration, from consumer to public administration [5]. This diversity ensures that many different stakeholders are in the same environment and that trade takes place.

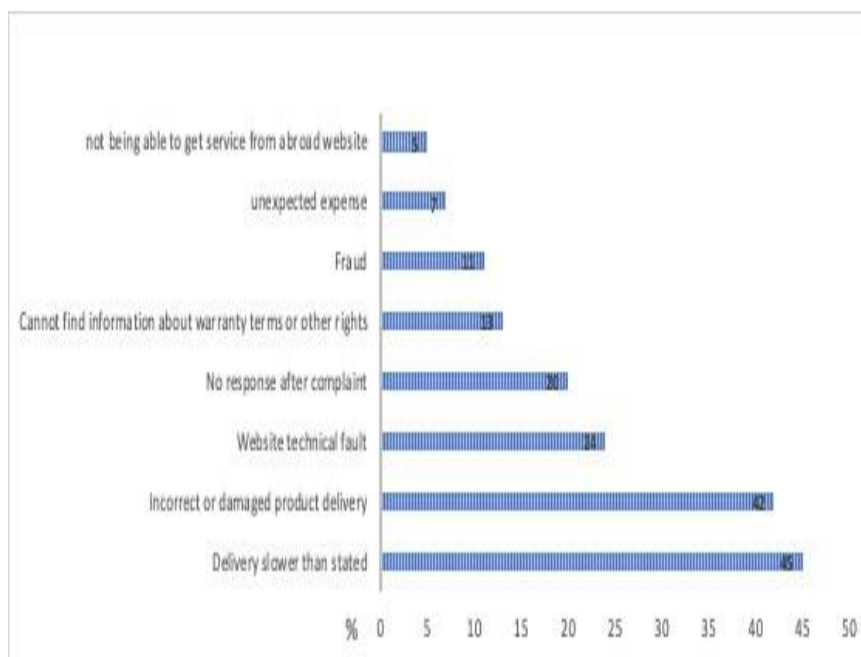


Figure 1. Complaints about internet shopping



While business-to-business e-commerce is a type of shopping for providing raw materials within or between companies; business-to-consumer e-commerce is the sale of products or services targeted at individual consumers. Likewise, e-commerce from consumer to consumer and activities from consumer or business to public administration are parameters that can be characterized under the title of e-commerce, although they involve different processes. In addition to the economic variables in the country, e-commerce can be affected by different factors such as the prevalence of financial products, the status of the internet infrastructure and logistics infrastructure [6]. Consumers' expectations for the improvement of after-sales processes are also one of the topics that e-commerce should improve. According to the TUIK 2016 report, the expectations of consumers regarding their complaints and the improvement of after-sales processes are given in Figure 1 [7].

When the reasons for complaints are examined, it is seen that the slower delivery than stated is the subject that receives the most complaints. In addition, reasons such as incorrect product delivery and no response from the seller are common

complaints in internet shopping. In order to prevent all these complaints, to meet customer expectations and to increase the share in total trade, the e-commerce approach must evaluate the opportunities well and strengthen the weak points. Opportunities such as increase in dynamic and young population, increase in internet usage, opportunities to reach new markets, accessibility, decrease in transaction costs are important opportunities for e-commerce and structural problems related to e-commerce can be solved by creating dynamic strategies. When look at the literature studies, it is seen that the studies generally concentrate on the obstacles in front of e-commerce, the general situation of e-commerce, the effect of technological developments on e-commerce, e-commerce strategies. In this sense, the presented study is important in terms of filling an important gap in the field and providing a new perspective. The study aims to propose a strategy according to the type of service to the businesses that provide services over the internet and aims to determine the strategies that e-commerce businesses should attach importance to in order to improve themselves.

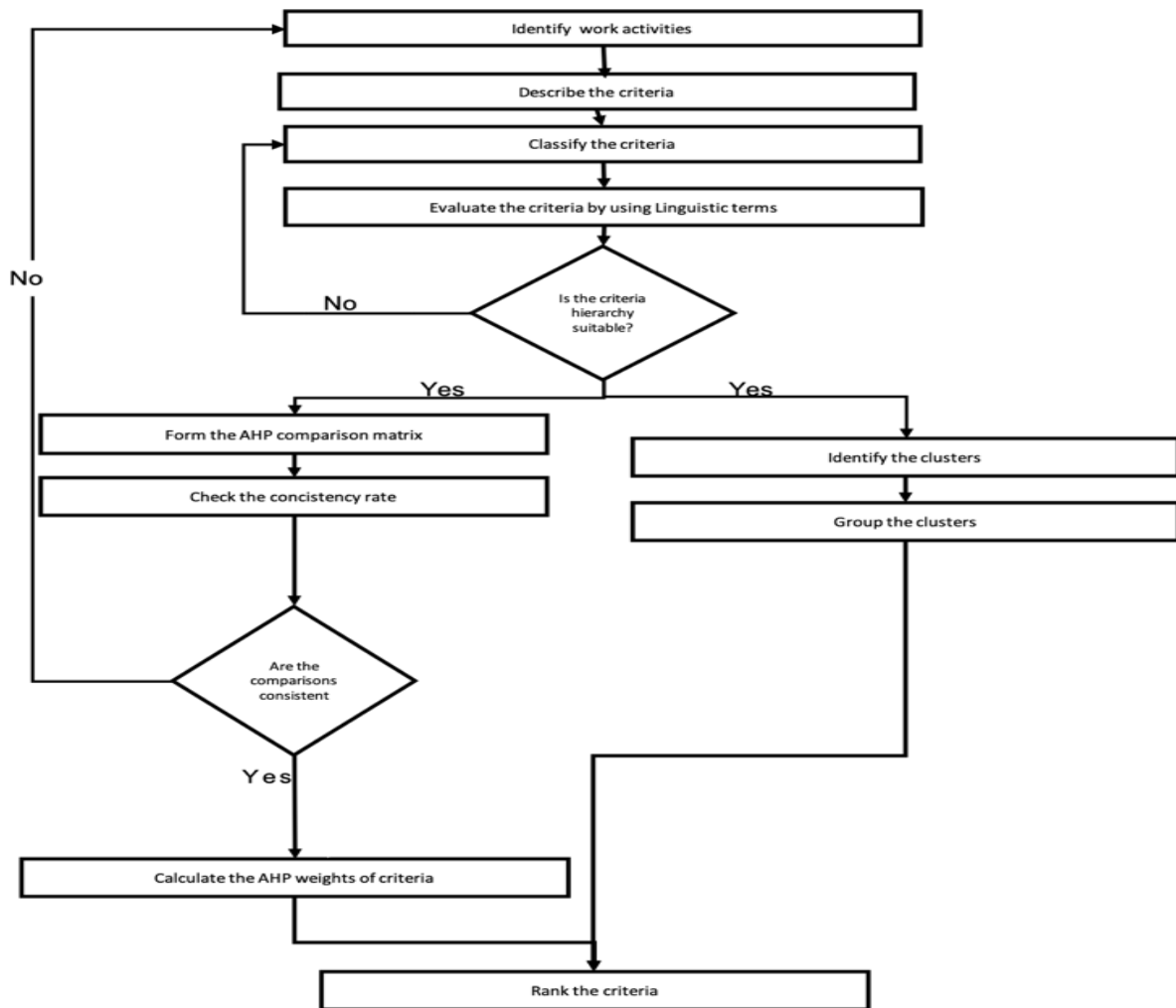


Figure 2. The framework of the proposed study

Studies in which data mining is used in studies on e-commerce businesses are included in the literature. In order to understand the behavior of e-commerce customers, strategies can be produced by classifying them with cluster analysis [8]. Apart from clustering of data mining techniques, artificial neural networks are frequently used in e-commerce studies [9-11]. Studies on e-commerce businesses are also frequently encountered in econometric studies. In the study on sales forecasting with artificial neural network modeling, it was investigated whether it is possible to train a single model to predict sales in all regions [12]. Since it can use data mining within unstructured textual structures, it can be the subject of analysis in the comments in e-commerce businesses [13-14]. The aim of this study is to classify the e-commerce businesses serving in Turkey and to produce specific strategies. For this purpose, firstly, two e-commerce groups were created with the clustering method. Then, using a common criterion pool, which criterion was important in these two groups was investigated by SF-AHP. It is aimed to produce separate strategies for each group of e-commerce businesses based on the criteria obtained as a result of the SF-AHP analysis. In the study, E-commerce sites serving in Turkey were compared, and 14 e-commerce sites were determined as alternatives based on expert opinions. These identified e-commerce sites were evaluated in terms of criteria such as brand image & reliability, campaign, cargo speed, packaging, payment options, personnel, call center services and functionality of the application. In the first part of the study, two clusters of e-commerce sites were created using cluster analysis. These clusters are grouped as general service e-commerce sites and specific service e-commerce sites. Thus, two homogeneous groups were formed from the large heterogeneous group. In the second part of the study, the criteria were compared and sorted using the spherical fuzzy AHP method. The rest of the paper organized as follows. In the introduction part of the paper, the concept of e-shopping and its history were mentioned and a literature review was presented, and the methodology of the study was summarized in the second part. In the third part of the paper, the findings are included, and the results are evaluated by discussing the findings in the following sections. The framework of the proposed study is given in Figure 2.

## 2 Material and method

### 2.1 Cluster analysis

Cluster analysis is to create homogeneous groups from large heterogeneous groups [15]. With cluster analysis, it is aimed to have high homogeneity within the cluster and heterogeneity between clusters. Cluster analysis, which came to the fore frequently in the 1960s and was initially used in fields such as biology and ecology, has largely focused on grouping units [16]. The application phases of cluster analysis begin with data entry. Then the similarity or distance has to be measured. This measurement can be made in various ways. However, in cluster analysis applications, three methods predominate: correlational measures, distance measures, and association measures. Correlation and

distance measures require metric data, while correlation measures may contain non-metric data. Considering that different measurement choices will result in different clustering results, the similarity measure to be used should be decided. The most commonly used similarity measurement method in practice is to use distance measures. In this context, Minkowski distance, Manhattan City-Block distance, Euclidean distance, Mahalanobis distance, Hotelling T<sup>2</sup> distance and Canberra distance are frequently used. Clustering is generally carried out in two ways: hierarchical clustering and non-hierarchical clustering. The most used methods are the hierarchical group of methods. The most preferred non-hierarchical clustering method is the k-means method. In this technique, units are divided into k clusters with the smallest sum of squares within clusters. First, each of the first k observations is taken as a cluster with one observation. In the second step, each of the remaining n-k observations is assigned to the cluster with the closest mean, and the cluster means are recalculated after each assignment. After all units are assigned to clusters, reassignment of n observations is made according to the cluster averages found last. Finally, in the final clustering relative to the previous cluster, the previous step is repeated until the observation transition between clusters stops [17]. Hierarchical methods are divided into two as agglomerative hierarchical cluster and divisive hierarchical cluster. The most effective method of hierarchical clustering is the hierarchical agglomeration method. The best part of the stacker clustering methods is that they are easy to read and interpret [18]. The divisive hierarchical clustering algorithm, which starts with assuming that all units are in a single cluster, is then divided into two additional clusters containing the most different units at each step. A single cluster is divided into two clusters, then one of these two clusters is divided into a total of three clusters. This continues until all observations become single-member clusters. Among the most widely used hierarchical stacker methods are the single link method, the full link method, the average link method and the Ward's method. There are many clustering algorithms in the literature. The choice of clustering algorithm to be used depends on the data type and purpose. The between-groups linkage method was used in hierarchical clustering. Euclidean distance calculation was preferred as a measurement. The steps of the algorithm are as follows.

1- The operations are started as n individuals and n clusters.

2- The two closest clusters are combined. Here, the distance ( $d_{ij}$ ) between two clusters is the Euclidean distance. Equation (1) is used for calculation.

$$d_{ij} = \sqrt{\sum (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (1)$$

3- By reducing the number of clusters by one, the iterated distance matrix is found.

4- Steps 2 and 3 are repeated (n-1) times [19].

## 2.2 Analytical hierarchy process

The Analytical Hierarchy Process (AHP) is one of the most preferred Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods. Developed by Saaty [20-21], this method involves a hierarchical order. At the top level of the hierarchy there is the goal. At one level lower, there are the main criteria and, if any, sub criteria below the main criteria. At the lowest step there are decision options, namely alternatives. AHP can be applied easily with many criteria, and it is a very effective method of making group decisions. Thanks to a sensitivity analysis, the flexibility of the result can be easily tested. AHP can evaluate both quantitative and qualitative criteria in decision making and include the preferences, judgments, intuitions and experiences of the group or individuals in the decision process. It is one of the most useful multi-criteria decision-making methods with a hierarchical structure that enables complex problems to be solved [22]. In the classical method, the evaluations of decision makers are represented as definite numbers. Nevertheless, fuzzy logic provides a mathematical capability that can be used to capture the uncertainties accompanying the human cognitive process in cases where decision makers cannot express their evaluations with definite numbers. The proposed spherical fuzzy AHP method in this study consists of several steps described in the following section.

Step 1. A hierarchical structure is created.

Step 2. Two-way comparisons are constructed using spherical fuzzy judgment matrices based on the linguistic terms given in Table 1. Equations (2) and (3) are used to obtain the score indices (SI).

$$SI = \sqrt{|100 * [(\mu_{\tilde{A}_s} - \pi_{\tilde{A}_s})^2 - (\nu_{\tilde{A}_s} - \pi_{\tilde{A}_s})^2]|}$$

for AMI, VHI, HI, SMI, and EI (2)

$$\frac{1}{SI} = \frac{1}{\sqrt{|100 * [(\mu_{\tilde{A}_s} - \pi_{\tilde{A}_s})^2 - (\nu_{\tilde{A}_s} - \pi_{\tilde{A}_s})^2]|}}$$

for EI, SLI, LI, VLI and ALI (3)

Where  $\mu$ ,  $\nu$  and,  $\pi$  are the membership degree, nonmembership degree, and hesitancy degree of  $x$ , respectively.

Step 3. The consistency of pairwise comparison matrices is checked.

Step 4. The spherical fuzzy local weights for criteria and alternatives are calculated.

Using the SWAM operator given in Equation (4), the weight of each alternative is then determined [23].

$$SWAM_w(A_{S1}, \dots, A_{Sn}) = \left\{ \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{A_{Si}}^{wi})^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}, \prod_{i=1}^n (\nu_{A_{Si}}^{wi}), \left[ \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{A_{Si}}^{wi}) - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{A_{Si}}^2 - \pi_{A_{Si}}^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

where  $w=1/n$ . (4)

Step 5. A hierarchical ranking of layers is created to obtain overall weights. Criterion weights are made fuzzy using

equation (5) and the score function (S). It is normalized by equation (6). The spherical fuzzy product given by Eq. (7) is applied.

$$S(\tilde{w}_j^s) = \sqrt{|100 * [(3\mu_{\tilde{A}_s} - \frac{\pi_{\tilde{A}_s}}{2})^2 - (\frac{\nu_{\tilde{A}_s}}{2} - \pi_{\tilde{A}_s})^2]|}$$
 (5)

$$\bar{w}_j^s = \frac{S(\tilde{w}_j^s)}{\sum_{j=1}^n S(\tilde{w}_j^s)}$$
 (6)

$$\tilde{A}_{Sij} = \bar{w}_j^s \cdot \tilde{A}_{Si} = \left\langle (1 - (1 - \mu_{\tilde{A}_s}^2)^{\bar{w}_j^s}), \nu_{\tilde{A}_s}^{\bar{w}_j^s}, ((1 - \mu_{\tilde{A}_s}^2)^{\bar{w}_j^s} - (1 - \mu_{\tilde{A}_s}^2 - \pi_{\tilde{A}_s}^2)^{\bar{w}_j^s})^{1/2} \right\rangle \forall i$$
 (7)

The final spherical fuzzy AHP score ( $\tilde{F}$ ), for each alternative  $A_i$ , is obtained by carrying out the spherical fuzzy arithmetic addition over each global preference weights, as given in Eq. (8)

$$\tilde{F} = \sum_{j=1}^n \tilde{A}_{Sij} = \tilde{A}_{S1i} \oplus \tilde{A}_{S2i} \dots \oplus \tilde{A}_{Sin} \forall i$$
 (8)

i.e.  $\tilde{A}_{S11} \oplus \tilde{A}_{S12} = \left\langle (\mu_{\tilde{A}_{S11}}^2 + \mu_{\tilde{A}_{S12}}^2 - \mu_{\tilde{A}_{S11}}^2 \mu_{\tilde{A}_{S12}}^2)^{1/2}, \nu_{\tilde{A}_{S11}} \nu_{\tilde{A}_{S12}}, (1 - \mu_{\tilde{A}_{S12}}^2) \pi_{\tilde{A}_{S11}}^2 + (1 - \mu_{\tilde{A}_{S11}}^2) \pi_{\tilde{A}_{S12}}^2 - \mu_{\tilde{A}_{S11}}^2 \mu_{\tilde{A}_{S12}}^2 \right\rangle^{1/2}$

Step 6. The final score for each alternative is determined using the score function given by Eq. (5).

Step 7. Alternatives are ranked according to their point scores. The largest value indicates the best solution [24 - 27].

**Table 1.** Linguistic measures of importance

Linguistic measures of importance used for pairwise comparisons		
	( $\mu, \nu, \pi$ )	Score Index (SI)
Absolutely more important (AMI)	(0.9, 0.1, 0.0)	9
Very high importance (VHI)	(0.8, 0.2, 0.1)	7
High importance (HI)	(0.7, 0.3, 0.2)	5
Slightly more important (SMI)	(0.6, 0.4, 0.3)	3
Equally important (EI)	(0.5, 0.4, 0.4)	1
Slightly low importance (SLI)	(0.4, 0.6, 0.3)	1/3
Low importance (LI)	(0.3, 0.7, 0.2)	1/5
Very low importance (VLI)	(0.2, 0.8, 0.1)	1/7
Absolutely low importance (ALI)	(0.1, 0.9, 0.0)	1/9

## 3 Findings

Based on expert opinions, 14 e-commerce sites were determined as alternatives in the paper. These identified e-commerce sites were evaluated in terms of criteria such as brand image & reliability, campaign, cargo speed, packaging, payment options, personnel, call center services and interface functionality of the application. In the first part

of the study, two clusters of e-commerce sites were created using cluster analysis. These clusters are grouped as general service e-commerce sites and specific service e-commerce sites. Thus, two homogeneous groups were formed from the large heterogeneous group. In the second part of the study, the criteria were compared and sorted using the spherical fuzzy AHP method. Looking at the criteria; A brand's image is a term that describes consumers' thoughts, impressions, ideas and feelings about the brand. In other words, brand image is consumers' views on how they perceive and interpret the brand's identity. Campaign is an important competitive power for e-commerce sites. Campaigns increase sales, attract attention and enable the brand to reach more people. Today, consumers give importance to the packaging of the product and the speed of shipping. The packaging of the product is important in terms of both hygiene and delivery of the product without any damage. In addition, payment options for consumers are an important criterion in choosing an e-shopping site. Some e-commerce sites only have the option to pay with credit profit. However, some e-commerce sites had card payment, cash on delivery, coupon options, and these options make shopping more attractive. For consumers, easy access to the call center regarding the product or service they purchase and personnel criteria affect their e-commerce site preferences. In addition, the simplicity of the interface used and the functionality of the site are also important parameters. Situations such as a plain and simple interface, safe shopping, protection of personal data and personalization of consumer-specific options are important for the consumer. In Figure 3, two homogeneous groups of e-commerce sites were created using cluster analysis. While the first group is the group of e-commerce businesses that provide general services, the second group includes businesses that provide specific services.

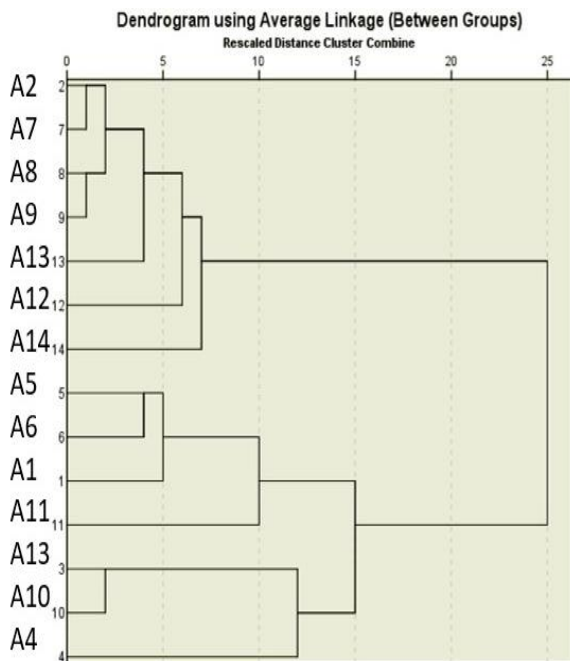


Figure 3. Cluster analysis results

The criteria determined in the second part of the study were compared for both groups using the spherical fuzzy AHP method. In Table 2, the decision matrix for general service e-commerce sites is given. In Table 3, the weights and rankings of the criteria for general service e-commerce sites are given. Decision matrix for e-commerce sites providing specific services is given in Table 4. In Table 5, the weights and rankings of the criteria for e-commerce sites providing specific services are given.

Table 2. Decision matrix (E-commerce sites providing general service)

	Brand image	Campaign	Shipping Speed	Packaging	Payment Option	Employee	Call Center	Interface Usability
$\mu$	0.50	0.47	0.14	0.20	0.55	0.14	0.12	0.70
$\nu$	0.40	0.59	0.87	0.80	0.50	0.87	0.88	0.32
$\pi$	0.40	0.10	0.10	0.10	0.11	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.13	0.40	0.08	0.08	0.25	0.24	0.13	0.08
$\nu$	0.28	0.40	0.83	0.83	0.40	0.66	0.80	0.52
$\pi$	0.10	0.40	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.83	0.77	0.50	0.76	0.66	0.14	0.14	0.78
$\nu$	0.17	0.25	0.40	0.27	0.42	0.87	0.87	0.24
$\pi$	0.10	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.71	0.77	0.66	0.50	0.66	0.14	0.35	0.66
$\nu$	0.32	0.25	0.42	0.40	0.41	0.87	0.63	0.36
$\pi$	0.10	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.10
$\mu$	0.71	0.60	0.76	0.76	0.50	0.36	0.35	0.66
$\nu$	0.32	0.40	0.27	0.27	0.40	0.62	0.63	0.36
$\pi$	0.10	0.10	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.10
$\mu$	0.87	0.79	0.87	0.87	0.75	0.50	0.42	0.61
$\nu$	0.13	0.20	0.13	0.13	0.24	0.40	0.52	0.46
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00
$\mu$	0.89	0.82	0.87	0.87	0.76	0.72	0.50	0.84
$\nu$	0.11	0.18	0.13	0.13	0.23	0.25	0.40	0.17
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00
$\mu$	0.60	0.77	0.17	0.65	0.57	0.74	0.20	0.50
$\nu$	0.42	0.25	0.83	0.38	0.48	0.29	0.81	0.40
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.00	0.40
$\mu$	0.74	0.71	0.66	0.70	0.62	0.48	0.32	0.67
$\nu$	0.24	0.29	0.38	0.33	0.37	0.55	0.67	0.34
$\pi$	0.45	0.11	0.11	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00



**Table 3.** Weights and ranking

	s	w	Rank
Brand image	19.57	0.14	4
Campaign	20.90	0.15	1
Shipping Speed	19.26	0.14	5
Packaging	20.50	0.15	2
Payment Option	18.17	0.13	6
Employee	14.09	0.10	7
Call Center	8.84	0.06	8
Interface Usability	19.94	0.14	3

**Table 4.** Decision matrix (E-commerce sites with specific services)

	Brand image	Campaign	Shipping Speed	Packaging	Payment Option	Employee	Call Center	Interface Usability
$\mu$	0.50	0.66	0.65	0.66	0.67	0.72	0.67	0.70
$\psi$	0.40	0.40	0.43	0.40	0.39	0.31	0.39	0.32
$\pi$	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.09	0.40	0.08	0.08	0.24	0.06	0.24	0.08
$\psi$	0.32	0.40	0.40	0.40	0.32	0.20	0.32	0.25
$\pi$	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.82	0.55	0.50	0.87	0.66	0.50	0.18	0.74
$\psi$	0.21	0.51	0.40	0.13	0.42	0.58	0.83	0.29
$\pi$	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.54	0.54	0.14	0.50	0.66	0.32	0.42	0.70
$\psi$	0.55	0.55	0.87	0.40	0.42	0.67	0.52	0.33
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.68	0.60	0.76	0.76	0.50	0.64	0.42	0.70
$\psi$	0.36	0.42	0.27	0.27	0.40	0.38	0.52	0.33
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00
$\mu$	0.61	0.54	0.87	0.87	0.69	0.50	0.32	0.81
$\psi$	0.44	0.55	0.13	0.13	0.32	0.40	0.67	0.18
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00
$\mu$	0.69	0.60	0.87	0.87	0.72	0.81	0.50	0.86
$\psi$	0.34	0.42	0.13	0.13	0.25	0.18	0.40	0.14
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00
$\mu$	0.60	0.55	0.70	0.75	0.66	0.32	0.16	0.50
$\psi$	0.42	0.52	0.33	0.25	0.40	0.67	0.85	0.40
$\pi$	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.40
$\mu$	0.62	0.56	0.69	0.76	0.63	0.57	0.41	0.71
$\psi$	0,37	0,47	0,31	0,24	0,36	0,38	0,53	0,27
$\pi$	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**Table 5.** Weights and ranking

	s	w	Rank
Brand image	16.480	0.113	7
Campaign	16.739	0.115	6
Shipping Speed	20.726	0.142	3
Packaging	22.653	0.156	1
Payment Option	18.830	0.129	4
Employee	16.984	0.117	5
Call Center	12.099	0.083	8
Interface Usability	21.132	0.145	2

**4 Conclusion and discussion**

E-commerce is a system that works with the logic of digitally processing, storing and transmitting the functions of companies in the form of voice, text and image. In other words, e-commerce is the realization of commercial transactions in electronic environment. Speed, simplicity, reliability and performance are crucial values for e-commerce. The aim of e-commerce is to deliver products and services to the customer in the easiest, fastest and most reliable way. Thanks to e-commerce shopping, customers can quickly access all the information about the product they want and make comparisons between similar products. This situation has led to an increase in the importance of e-commerce sites and the use of these sites has become widespread. With the spread of e-commerce sites, a brand perception begins to form on the behalf of the customers, and with this perception, customers tend to shop more from the e-commerce sites they feel closest to and establish a connection with. Criteria such as the campaigns organized by the shopping sites, the way the products are packaged, the fast and safe delivery of the products to the customers, and the payment options are the necessary criteria for an e-commerce site to reach more customers, it's also necessary for creating a loyal customer base and increasing its competitive power. In the first part of the presented study, two clusters of e-commerce sites were created using cluster analysis. These clusters are grouped as general service e-commerce sites and specific service e-commerce sites. Thus, two homogeneous groups were formed from the large heterogeneous group. Although they all seem to provide the same service at first, it has been seen that groups with different features of e-commerce sites are formed with the achievement of more homogeneous structures. In the second part of the study, the criteria were compared and sorted using the spherical fuzzy AHP method. According to the results obtained; It has been determined that the campaign is the most important criterion in e-commerce sites that provide general service. Packaging follows this criterion. In this group, the interface usability and brand image of the application were determined as the third and fourth in the ranking. This situation is expected for general service e-commerce sites. Customers wait for the campaign times for shopping or turn to e-commerce sites with more campaigns. For consumers, the packaging style of the products they buy

is important, the importance given to packaging is actually the key to the safe delivery of the product and the customer to feel that he is taken care of. Using a simple interface while shopping has a positive effect on the customer experience. A brand perception for that e-commerce site is formed in the mind of the customer, who makes a purchase from a well-designed and useful e-commerce site, and whose product is delivered quickly and perfectly. Interface usability has come to the fore in both general and specific e-commerce websites. When shopping is done through e-commerce applications or web interface, the functionality and ease of these areas where the customer is contacted will be effective in choosing the same business for the next order of the customer. Since in-app question-answer or follow-up is generally used for product, order tracking, purchasing or different questions, it has been determined that criteria such as personnel, call center are not very effective and are not very important for the customer compared to other criteria. When look at the e-commerce sites serving in the specific field, it is seen that the packaging is in the first place. Since the e-commerce sites in this group are mainly food or emergency products, it is an expected result that consumers want to be sensitive in packaging. It is important for this group that an ordered dish is packaged hygienically without getting cold. The usefulness of the interface of the site and the speed of shipping are other important criteria. Again, it has been determined that the call center is perceived as less important compared to other criteria, as there are in-app question-answer options on the sites in this group. Although the personnel criterion is lower in the ranking for e-commerce sites that provide general service, it is higher in the ranking for e-commerce sites that provide specific services because each company uses its own courier in these sites, and the customer is dealing with different personnel so this criterion gains importance for this group. In the study, 14 e-commerce sites were evaluated in terms of criteria such as service variety, number of cities served, product variety, cargo speed, average delivery time, number of contracted cargos, campaigns, personnel, payment options, call center, application functionality, and brand image. Criteria comparisons were made for the clustered homogeneous groups that emerged, and the ranking was made by calculating the criterion weights. In the study, clustering was done on 14 e-commerce companies. The limitations of the study can be summarized as follows. The first limit is the geographical constraint of the study. In other words; all businesses in the study provide service in Turkey. The second constraint is the measurable variables for cluster analysis. The third constraint is on the basis of variables. Eight variables were considered when listing the mentioned businesses. By increasing these variables, different detailed studies can be done. For the future studies, more different cluster-based strategies can be produced by obtaining more clusters with a more comprehensive sample in different studies. A similar study can be carried out with other computational methods in cluster analysis. By using criterion weights, e-commerce sites in each cluster can be ranked with different multi-criteria decision-making methods.

## Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

## Similarity rate: %2

## References

- [1] Organization for economic co-operation and development, Glossary of statistical terms: Electronic commerce. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=4721> /Accessed 13 December 2021.
- [2] Current status of e-commerce in Turkey, <http://www.halitkaya.net/turkiyede-ki-e-ticaretin-guncel-durumu/> Accessed 16 December 2021.
- [3] J. Sullivan, and K. Walstrom, Consumer perspectives on service quality of electronic commerce web sites, *Journal of Computer Information Systems*, 41(3), 8-14, 2001. <https://doi.org/10.1080/08874417.2001.11647001>
- [4] P. Mwencha, Taxation of electronic commerce-a commentary, *Financing for Development*, 1(1). 70- 79, 2009.
- [5] Ö. Toptan Yılmaz and O. Bayram. E-commerce and e-export in Turkey during the COVID-19 pandemic. *Kayseri University Journal of Social Sciences*, Vol 2, No 2, 37-54, 2020. <https://doi.org/10.51177/kayusosder.777097>
- [6] B. Yeniçeri, An e-Commerce strategy: content marketing, new media refereed, *Academic, E-journal*, issue 8, 25-40, 2020.
- [7] TUSIAD, The Driving Force of the Economy in a Digitalized World: E-Commerce. [https://www.eticaretraporu.org/wp-content/uploads/2017/04/TUSIAD\\_E-Ticaret\\_Raporu\\_2017.pdf](https://www.eticaretraporu.org/wp-content/uploads/2017/04/TUSIAD_E-Ticaret_Raporu_2017.pdf) / Accessed 16 December 2021.
- [8] Y. Jiang, and S. Yu, Mining e-commerce data to analyze the target customer behavior. In *First International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining* pp. 406-409, IEEE, 2008.
- [9] H. Pan, and H. Zhou, Study on convolutional neural network and its application in data mining and sales forecasting for E-commerce. *Electronic Commerce Research*, 20(2), 297-320, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10660-020-09409-0>
- [10] K. Bandara, P. Shi, C. Bergmeir, H. Hewamalage, Q. Tran, and B. Seaman, Sales demand forecast in e-commerce using a long short-term memory neural network methodology. In *International conference on neural information processing* 462-474, Springer, Cham, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-36718-3\\_39](https://doi.org/10.1007/978-3-030-36718-3_39)
- [11] L. Peng, and L. Lai, A service innovation evaluation framework for tourism e-commerce in China based on BP neural network. *Electronic Markets*, 24(1), 37-46, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12525-013-0148-0>
- [12] K. Zhao, and C. Wang, Sales forecast in e-commerce using convolutional neural network. *arXiv preprint arXiv:1708.07946*, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.07946>

- [13] A. Bayhaqy, S. Sfenrianto, K. Nainggolan, and E.R. Kaburuan, Sentiment analysis about E-commerce from tweets using decision tree, K-nearest neighbor, and naïve bayes. International conference on orange technologies (ICOT) 1-6, IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICOT.2018.8705796>
- [14] M. Zhang, E-commerce comment sentiment classification based on deep learning. In 2020 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics, 184-187, IEEE, 2020. <https://doi.org/10.1109/ICCCBDA49378.2020.9095734>.
- [15] C. Yılmaz Yaman and G. A. Doğu, Examination of provinces in terms of school sports activities with clustering analysis, Iğdır University Journal of Social Sciences, 26, pp.182-205, 2021.
- [16] J. F. Hair Jr., W. C. Black, J. Barry Babin and R. E. Anderson, Multivariate Data Analysis, Harlow: Pearson Education Limited, 2014.
- [17] H. Tatlıdil, Applied Multivariate Statistical Analysis, Ankara: Akademi Printing House, 1992.
- [18] Ş. Kalaycı, SPSS Applied Multivariate Statistical Techniques, Ankara: Dynamic Academy, 2017.
- [19] M. Yeşilbudak, H. Kahraman, and H. Karacan, Veri madenciliğinde nesne yönelimli birleştirici hiyerarşik kümeleme modeli. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26(1), 27-39, 2011.
- [20] S. Yüksel, S. Eti, S. Prosekov, and G.S. Uluer, A study on the energy problem in the Eastern Mediterranean: Text mining and AHP-based strategy recommendations. In Strategic Approaches to Energy Management 27-38, Springer, Cham, 2021. [https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-76783-9\\_3](https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-76783-9_3)
- [21] T. L. Saaty, Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process, Management Science, vol. 32, no. 7, p. 841-855, 1986.
- [22] A. Y. Korkusuz, U. H. İnan, Y. Özdemir and H. Başlıgil, Occupational health and safety performance measurement in healthcare sector using integrated multi criteria decision making methods, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University vol. 35, no. 1, p. 81-96, 2020. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.441032>
- [23] S. Ashraf, S. Abdullah, T. Mahmood, F. Ghani, and T. Mahmood, Spherical fuzzy sets and their applications in multi-attribute decision making problems. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 36(3), 2829-2844, 2019. <https://doi.org/10.3233/JIFS-172009>
- [24] F. Kutlu Gündoğdu and C. Kahraman, A Novel spherical fuzzy analytic hierarchy process and its renewable energy application. Soft Computing 24, 4607-4621, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04222-w>
- [25] M. Mathew, R.K. Chakraborty, and M.J. Ryan, A novel approach integrating AHP and TOPSIS under spherical fuzzy sets for advanced manufacturing system selection. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 96, 103988, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103988>
- [26] F. Kutlu Gündoğdu, and C. Kahraman, Spherical fuzzy analytic hierarchy process (AHP) and its application to industrial robot selection. In International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems, 988-996, Springer, Cham, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23756-1\\_117](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23756-1_117)
- [27] O. Dogan, Process mining technology selection with spherical fuzzy AHP and sensitivity analysis. Expert Systems with Applications, 178, 114999, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114999>





## Çekirdeksiz kuru zeytin kalite özellikleri üzerine ultrason, dondurma ve kurutma işlemlerinin etkileri

### The effects of ultrasound, freezing and drying on the quality characteristics of pitted dried olives

Melisa Özçelik <sup>1</sup> , Alev Yüksel Aydar <sup>2</sup> , Tuncay Yılmaz <sup>3,\*</sup> 

<sup>1,2,3</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 45140, Manisa Türkiye

#### Öz

Zeytin, sağlıklı beslenmenin önemli bileşenleri olan fenolik ve antioksidanlar vb. mikro besinlerce zengindir. Sofralık zeytin üretiminde, acılık etmeni bileşiklerin azaltılması için gerçekleştirilen uygulamalar kalite kaybına, son üründe tuz miktarının artmasına ve atık su oluşumuna sebep olmaktadır. Çalışma kapsamında, daha önce tekli ve başarılı uygulamaları olan sonikasyon, dondurma ve kurutma işlemlerinin bileşke etkileri, yüzey yanıt yöntemiyle incelenmiştir. Olgun Edremit çeşidiyle üretimi gerçekleştirilerek %nem, %DPPH (2.2- diphenyl- 1-picrylhydrazyl), renk ve dokusal özellikleri incelenmiştir. İşlenmiş zeytinlerde son ürün nem değeri üzerinde sonikasyon süresi, kurutma sıcaklığının ve etkileşimlerinin önemli ölçüde değişkenlik sağladığı gözlemlenirken; %DPPH değerinde tüm faktörlerin etkili olduğu bulunmuştur. Fiziksel özellikleri incelendiğinde, renk değişiminde en önemli etki sonikasyon süresi ve kurutma sıcaklığı, dokusal özelliklerin genelinde kurutma sıcaklığı en önemli faktör niteliği kazanmaktadır. Tüm durumlar değerlendirildiğinde yeni ürün olan kuru zeytin üzerinde sonikasyon süresi, dondurma sıcaklığı ve kurutma sıcaklığı gibi fiziksel uygulamalar fiziksel ve kimyasal özellikler üzerinde etki göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Fiziksel yöntemlerle işleme, Zeytin fizikokimyasal özellikleri, Kuru zeytin

#### 1 Giriş

Zeytin (*Olea Europaea L.*), zeytingiller (*Oleacea*) familyasına ait, tazeyken yeşil olgunlaştıkça kararar Akdeniz iklimine özgü, etli ve tek çekirdekli bir meyvedir. Sofralık zeytin ve zeytinyağı olarak işlenebilmektedir [1]. Zeytin yetiştiriciliği yapılan bölgeler; iklim seçiciliği nedeniyle ülkemiz dahil toplam 40 ülkenin dahil olduğu Akdeniz Havzası bölgesi iklim özelliklerini gösteren bölgelerde yetiştirilmektedir [2, 3]. Bu meyve; %76-80 et, %20-24 oranında da çekirdekten oluşmaktadır. Yağ içeriği %20-35 aralığındayken, şeker içeriği ise %2-6 oranındadır [4].

Zeytin meyvesinin tüketilebilir hale gelmesi için sofralık zeytin veya zeytinyağı olarak işlenmesi gerekmektedir [5].

#### Abstract

Olive is rich in phenolics and antioxidants, which are important components of a healthy diet. In the production of table olives, the applications carried out to reduce the bitterness-causing compounds cause quality loss, increase in the amount of salt in the final product and waste water formation. The combined effects of sonication, freezing and drying processes were investigated by the surface response method. It was studied with the mature Edremit variety and its % moisture, %DPPH (2.2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), color and textural properties were examined. It was observed that sonication time, drying temperature and interactions provide significant variability on the final product moisture value. All factors were significant in %DPPH. The most important effect on color change is sonication time and drying temperature. Drying temperature is the most important factor in textural properties. It was found that sonication time, freezing temperature and drying temperature affect the properties of the dried olive.

**Keywords:** Physical processing, Olive physicochemical properties, Dried olives

Oleuropein; işlenmemiş zeytin ve zeytin ağacında bulunan, ham haldeki zeytine acı tat veren en yaygın fenolik bileşiktir. Acı tat kaynağı olan bu fenolik bileşik; elenolik asit ve hidroksitirosolün heterozidik esteridir [6]. Uygulanan işlemlerin amacı ise zeytin meyvesi ile ağacında baskın bulunan ve fenolik madde olan oleuropein maddesinin giderilmesidir [7].

Farklı olgunluk seviyelerinde toplanan zeytinler farklı yöntemlerle (İspanyol tipi, Kalamata tipi, Kaliforniya tipi, Sicilya tipi vb.) işlenerek yeşil ve siyah sofralık zeytinleri oluştururlar. Genel olarak salamura ile işlenen zeytinler; çeşitlerine ve elde edilmek istenen son ürünün yapısına göre içme suyu ile alkali ve/veya tuz kullanılarak 3-120 gün aralığında işlem görmekte ve 180 güne kadar fermantasyon uygulanarak işlenmektedir [8-10].



Kullanılan salamura çözeltileri ortalama %7-20 aralığında tuz içermektedir [11]. Bununla birlikte Dünya Sağlık Örgütü (WHO), tuz tüketiminin en fazla 5g/gün, sodyum alımının ise 2g/gün olması gerektiğini bildirip, değerlerin üzerinde tüketiminin ise; hipertansiyon, kalp-böbrek hastalıkları, obezite, diyabet, bazı kanser türlerine zemin oluşturduğunu ve kemik sağlığını olumsuz etkilediğini bildirmiştir [12]. Sağlıklı böbrek ve boşaltım sistemine sahip bireyler üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada; 24 saat içerisinde vücuttan atılan sodyum miktarı gün içerisindeki sodyum tüketime eş olduğu için toplumumuz üzerinde yapılan başka bir araştırmada bu hesaplama üzerinden gidilmiş, gün içerisinde kişi başı 16 g tuz tüketimi gerçekleştirildiği tespit edilmiştir [13]. Sağlık üzerindeki olumsuz etkiler tüketicileri düşük sodyum içerikli gıdalara yönlendirmektedir [14]. Dolayısıyla Akdeniz beslenme tipinin temelini oluşturan besinlerden zeytinin tüketimi, içeriğindeki tuz oranı yüzünden kısıtlanmaktadır. Alkali işleme yönteminde ise; %1.5-2 oranında hazırlanan kostik çözeltisi zeytin etinin 2/3'üne veya çekirdeğe işleyene kadar uygulanır. Ardından zeytinlerin pH'sı Türk Gıda Kodeksi Sofralık Zeytin Tebliği (Tebliğ No: 2014/33) [15] içeriğinde belirtilen sınır değerlerin altına indirilene kadar birçok kez yıkama-havalandırma işlemi uygulanır. Bu yıkama esnasında fazla miktarda su israf edilirken, yıkama sonrası açığa çıkan su ise çevre kirliliğine neden olmaktadır. Ayrıca siyah zeytinlerde, kostik uygulamasının ardından oluşan renk kaybını giderebilmek için ferro glukonat veya ferro laktat uygulaması yapılmaktadır. Bu uygulama sonrası pH yükselmesine karşı tekrar yıkama yapılmaktadır [16]. Sofralık siyah ve yeşil zeytin üretimi esnasında yapılan yıkamalar sonucu işleme yöntemine bağlı olarak farklı karakterizasyon ve miktarlarda atık sular açığa çıkmaktadır.

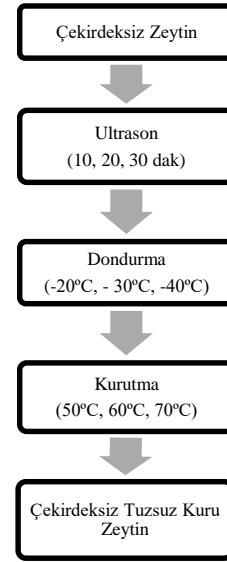
Tüm bu durumlar dikkate alındığında çevre dostu ve son üründe tuz kalıntı miktarını en aza indirebilecek işleme yöntemleri ile ilgili arayışlar önem kazanmaktadır. Ultrason ön işlemi bu kapsamda kayda değer öneme sahip bir "yeşil teknoloji" olarak değerlendirilebilmektedir. Ultrason, gıda endüstrisinde; yağ ve fenolik madde ekstraksiyonu, enzim ve mikrobiyal inaktivasyon, gaz giderme, köpük kırma, yüzey dezenfeksiyonu gibi çok geniş kullanım alanına sahip, çevre dostu ve ekonomik bir yöntemdir [17]. Bu çalışmada ultrason ile acılık bileşenlerinin yıkımı ve sulu ortama geçişini sağlayarak zeytinden uzaklaştırmak hedeflenmiştir. Donma-çözündürme işleminin gıdanın dokusal ve kimyasal yapısı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Daha önce donma uygulaması denenilen zeytinlerde acılık bileşeninde %5-30 seviyesinde azalma olabileceği tespit edilmiştir [18]. Kurutma işlemi ise özellikle termal degradasyondan sorumlu temel mekanizmaları bünyesinde barındıran geleneksel bir muhafaza yöntemidir. Bu açıdan bakıldığında zeytinlerde uygulanması ile hem raf ömrü uzun ürün elde edilebilmesi hem de acılık bileşimlerinin yıkıma uğratılması mümkün görülmektedir. Yapılan çalışmalarda, acılığı azaltma için zeytinlere 30-50°C'de 72 saate kadar uygulanan ısı işlemi ile acılaştırma üzerinde özellikle 40°C'nin üzerine çıkmanın önemli etki sağladığı ve 24 saatlik muamelenin yeterli olabileceği belirtilmiştir [19].

Bu çalışmada yeni bir gıda olarak kuru zeytin üretimi gerçekleştirilirken sonikasyon, donma-çözünme ve kurutma gibi fiziksel yöntemlere başvurulmuş ve bu yöntemlerin son ürün nem, kül, toplam antioksidan aktivite, renk ve dokusal özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

## 2 Materyal ve yöntem

Bu çalışmada kullanılan potasyum iyodür, kloroform, sodyum karbonat, asetik asit, potasyum persülfat, Folin-Ciocalteu reaktifi, gibi standartlar ve kimyasallar analitik saflıkta Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, ABD)'ten temin edilmiştir.

Çalışma materyali olan Edremit çeşidi zeytinler, 2020-2021 hasat döneminde Akhisar-Manisa'da faaliyet gösteren yerel üretici firmadan çekirdeği çıkartılmış olarak temin edilmiş ve analiz sürecine kadar +4°C'de muhafaza edilmiştir. Üretim süreci Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çekirdeksiz kuru zeytin üretim akım şeması

### 2.1 Fizikokimyasal analizler

Numunelerde nem tayini, zeytin püresinin 105°C'de sabit ağırlığa getirildiği etüv yöntemi ile [20], protein tayini, 5.3 faktörü kullanılarak Kjeldahl yöntemi ile [21], yağ tayini kurutulmuş zeytinde çözgen olarak dietil eterin kullanıldığı katı-sıvı ekstraksiyon yöntemi ile [22], kül tayini ise 550°C'de krozede yakmaya tabi tutularak hesaplanmıştır [23]. Ürünlerin ilk ve son tuz miktarının belirlenmesi için ise tuz tayini yapılmıştır [24]. Olgunlaşma indeksini (OI) belirlemek için her kasanın rastgele seçilen 100 adet zeytin muayene edilmiştir (Uluslararası zeytin konseyi, COI/OH/Doc. No 1, 2011). Öncesinde örneklerin ekvatoriyel bölgedeki renkleri kromometre (Konica Minolta Chromo Meter CR 5/Japonya) ile CIE L\*,a\* ve b\* renk sistemi kullanılarak ölçülmüştür [25]. Burada L\* parlaklığı, a\* yeşil-kırmızı eksenini, b\* ise mavi-sarı eksenini temsil etmektedir. Bu veriler üzerinden Denklem 1 kullanılarak renk indeksi (RI) hesaplanmıştır. Toplam renk değişimi ( $\Delta E$ ); son ürünün ham ürün ile karşılaştırılması prensibi kullanılarak Denklem 2 ile hesaplanarak belirlenmiştir [26].

$$RI = L^*(a^* - b^*)/100 \quad (1)$$

$$\Delta E = [(L_i^* - L_0^*)^2 + (a_i^* - a_0^*)^2 + (b_i^* - b_0^*)^2]^{1/2} \quad (2)$$

Zeytinlerde sertlik, esneklik, yapışkanlık, sakızimsılık ve çignenebilirlik özellikleri tekstür analiz cihazı (TA-XT Plus Texture Analyser Stable Micro Systems/ England) kullanılarak süre-kuvvet spektrumları yardımıyla; sertlik için [Denklem 3-a](#), esneklik için [Denklem 3-b](#), dayanıklılık için [Denklem 3-c](#), sakızimsılık için [Denklem 3-d](#) ve çignenebilirlik için [Denklem 3-e](#) kullanılarak belirlenmiştir [27-29]. Örneklerin boyutları ise dijital kumpas kullanılarak ölçülmüştür.

$$\text{Sertlik (N)} = \text{Güç, F değeri} \quad (3-a)$$

$$\text{Esneklik (mm)} = 2. \text{deformasyon noktası} / 1. \text{deformasyon noktası} \quad (3-b)$$

$$\text{Dayanıklılık} = 2. \text{sıkıştırma alanı} / 1. \text{sıkıştırma alanı} \quad (3-c)$$

$$\text{Sakızimsılık} = \text{Dayanıklılık} * \text{Sertlik} \quad (3-d)$$

$$\text{Çignenebilirlik} = \text{Sakızimsılık} * 2. \text{deformasyon noktası} / 4 \quad (3-e)$$

Antioksidan aktivite tayini DPPH yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle göre; DPPH (2,2- diphenyl-1-picrylhydrazyl) radikali kullanılarak elde edilen örnekler spektrofotometrede 517nm dalga boyunda okunmuş, [Denklem 4](#) yardımı ile inhibisyon (%) olarak hesaplanmıştır. [30, 31]. [Denklem 4](#) kullanılarak yapılan hesaplamada  $A_c$ , kontrol absorbansı;  $A_s$ , örnek absorbansı olarak ifade edilmektedir

$$\text{İnhibisyon (\%)} = ((A_c - A_s)/A_c) * 100 \quad (4)$$

## 2.2 Fiziksel uygulamalar ve kuru zeytin üretimi

400 g çekirdeksiz zeytin/ 4 L saf su kullanılarak katı/sıvı 1:10 oranında sabit tutulan örnekler, ultrasonik banyo içerisinde (Elmasonic 50 kHz/Türkiye) farklı sürelerde (10, 20, 30 dak.) ultrasonik yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Ultrason mekanizmasının kavitasyon etkisini maksimum seviyede gözlemleyebilmek adına zeytinler, ultrasonik banyo içerisindeki sepete koyularak uygulama gerçekleştirilmiştir. Uygulama esnasında sıcaklık değişimi K-tipi ısı eşler kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Yıkama işleminin ardından ultrasonik banyodan çıkarılan zeytinler kurutma kâğıdı kullanılarak yüzey sularından arındırılmıştır. Takip eden işlem olarak yıkama sonrası zeytinler, bireysel hızlı dondurucu (IQF) kullanılarak merkez sıcaklıkları -20°C, -30°C ve -40°C olacak şekilde dondurulmuş ve depolanmıştır. Dondurma işleminin ardından kurutma öncesi 10 dakika boyunca oda sıcaklığında bekletilerek çözünmesi sağlanan zeytinler, 1 m/s hava hızında farklı sıcaklıklarda (50°C, 60°C, 70°C) sanayi tipi tepsili kurutucu (Eksis Makine/Türkiye) kullanılarak nem içeriği %20-27 aralığına düşürülene kadar kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrası üretim aşamaları tamamlanan zeytinler, hedeflenen fiziksel

ve kimyasal analizler uygulanana kadar vakumlanarak +4°C'de muhafaza edilmiştir.

## 2.3 Deneme deseninin oluşturulması ve etkilerin analiz edilmesi

Kuru zeytin üretimi sırasında uygulanan fiziksel yöntemler ve bu fiziksel yöntemlerin farklı kademelerinin modellenmesi bir yüzey yanıt yöntemi (YYY) olan üç faktörlü-üç seviyeli Box-Behnken Dizaynı (BBD) ile oluşturulmuştur. Üretim basamağını etkileyen bağımsız değişkenler ultrasonik yıkama süresi ( $X_1$ ), dondurma sıcaklığı ( $X_2$ ) ve kurutma sıcaklığı ( $X_3$ ) olarak belirlenmiştir. Bağımsız değişkenlerin seviyesi  $X_1$ , 10- 20-30 dak;  $X_2$ , (-20°C)- (-30°C)- (-40°C);  $X_3$ , (50°C)- (60°C)- (70°C) olarak belirlenmiştir. Uygulanan deneysel tasarım 5 merkezi nokta içermek üzere toplam 17 deney noktasından oluşmaktadır. Yanıt yüzey yöntemi ile gerçekleştirilen modelleme kapsamında BBD ile elde edilecek deneysel verilerin ne gerçeklikte temsil edildiğini belirlemek için varyant analizi (ANOVA) yapılmıştır. Bu şekilde her bir parametrenin her bir yanıt üzerindeki lineer, interaktif ve kuadratik etkileri %95 güven düzeyi temel alınarak değerlendirilmiş ve yüzde grafikleri ile gösterilmiştir. Modelin matematiksel uyumunu tanımlayabilmek için, bu işlemde kullanılan “uyum eksikliği” teriminin etkisinin minimize olduğu ve regresyon katsayısının maksimum olduğu modeller değerlendirilmiştir. Optimizasyon için ise en yüksek regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ve en düşük hata kareler ortalamasının karekökü (RMSE) değerli modeller ile çalışılmıştır. Modelin güvenilirliği ile olan etkileşimleri nedeniyle regresyon katsayısı ( $R^2$ ) ile düzeltilmiş regresyon katsayısı ( $Ad-R^2$ ) arasındaki fark incelenmiş, az olması dikkate alınmıştır [32-35]. Deney tasarımı ve verilerin analizi için Design Expert 11 paket programı kullanılmıştır.

## 3 Bulgular ve tartışma

Ayvalık çeşidi ham zeytinler üzerine yapılan bir çalışmada 3 farklı hasat grubu örnekler incelenmiş ve Uluslararası Zeytin Konseyi'nin belirttiği kriterler üzerinden değerlendirilmiştir. İlk hasat zeytinlerin olgunluk indeksi 0.8- 2.6 aralığında; ikinci hasat grubunun 1.9- 5.3 aralığında olduğu gözlemlenmiştir. İlk hasat grubu kabuk rengi yeşil ve sarımsı yeşil iken ikinci hasat grubu kabuk rengi ise sarımsı yeşil ve violet olarak yorumlanmıştır [36]. Çalışmada kullanılan çekirdeği çıkarılmış Edremit çeşidi zeytinlerin Uluslararası Zeytin Konseyi'nin belirlediği yöntem ile olgunlaşma indeksi 3.43 olarak tespit edilmiştir. Rengi ise sarımsı yeşil ve açık ton violet olarak yorumlanmıştır. Bu çalışmada ham örneklerde  $L^*$  değeri 21.58,  $a^*$  değeri 3.03,  $b^*$  değeri 1.97, (RI) değeri 0.229 olarak tespit edilmiştir. Uçkun ve Aksoy tarafından yapılan çalışmada (2020), çalışma materyali olarak Manisa ilinde yetiştirilmiş Edremit çeşidi zeytinlerin 4 farklı hasat grubu kullanılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde ilk hasatta  $L^*$  değeri 66.31,  $a^*$  değeri -21.16,  $b^*$  değeri 37.08; ikinci hasatta  $L^*$  değeri 55.10,  $a^*$  değeri -9.45,  $b^*$  değeri 27.75; üçüncü hasatta  $L^*$  değeri 45.31,  $a^*$  değeri 7.34,  $b^*$  değeri 16.40; son hasatta ise  $L^*$  değeri 29.20,  $a^*$  değeri 7.36,  $b^*$  değeri 12.42 olarak tespit edilmiştir. Renk incelemelerinin sonucunda ilk hasatta zeytinlerin yeşil renkte ardından hasat süresi uzadıkça  $L^*$  ve

b\* değerlerinde azalma, a\* değerinde artma gözlemlenmiş dolayısıyla kabuk renginin koyulaştığı hem görsel hem de mekanik olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan zeytinler ise hasat döneminin sonunda tedarik edildiği için, Uçkun ve Aksoy'un bahsedilen çalışmasındaki (2020) son hasat grubundan daha düşük L\* değeri, dolayısıyla daha koyu olduğu düşünülmektedir. Mekanik doku özellikleri hesaplandığında; Sertlik 0.494 N, esneklik 1.025, yapışkanlık 1.029, sakızimsılık 0.508 ve çiğnenebilirlik 0.521 olarak ölçülmüştür. Fiziksel ölçümlerde elde edilen değerler son ürün fiziksel özellikleri belirlenirken referans değeri olarak dikkate alınmıştır, böylece renk değişimi ham zeytin verileri kullanılarak hesaplanmıştır.

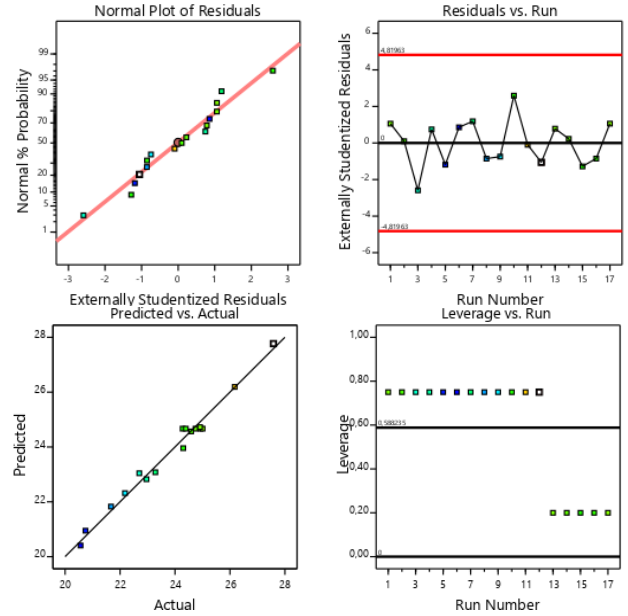
Çalışmada kullanılan zeytinlerin nem içeriği %60.13±0.15, kül içeriği %1.43±0.03, protein içeriği %2.22±0.55, yağ içeriği ise kuru temelde (KT) %31.43±1.15 olarak tespit edilmiştir. Sevim ve Tuncay tarafından yapılan çalışmada (2012) hasat dönemi 2008 yılının Eylül ayı olan Edremit (Ayvalık) çeşidi zeytinlerde nem içeriği %54.85 ±0.12, yağ içeriği 21.57 ± 0.11; 2009 yılının Kasım ayında hasat edilen yine aynı çeşit zeytinlerde ise %57.86±0.30, yağ içeriği 18.17± 0.26 olarak tespit edilmiştir [37]. Proje materyali olarak kullanılan Edremit çeşidi zeytinlerin nem ve yağ içeriği daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni zeytin meyvesinin yetiştiği bölge, toprak ve iklim yapısı, hasat dönemi farklılığı olduğu düşünülmektedir. Protein içeriği ise yapılan bir başka çalışmada %2.0 olarak tespit edilmiştir [38]. Tuz tayini sonucu ham zeytin içeriğindeki tuz minerali oranı %0.675±0.47 (Tablo 1) olarak tespit edilmiştir. Bu değer eser miktarda tespit edildiği için ihmal edilebilir seviyededir. Farklı çeşit sofralık zeytinlerde yapılan çalışmada Ayvalık, Domat, Gemlik, Memecik ve Uslu çeşidi zeytinler hem ham hem de sofralık halleri incelenmiş ve bu 5 farklı çeşit ham zeytinde tuz tespit edilememiştir [4].

**Tablo 1.** Ham ve son ürün zeytine ait bazı kalite özellikleri

Örnek	Protein (% kt)	Yağ (% kt)	Tuz (% kt)
Ham zeytin	2.22±0.55	31.43±1.43	0.675±0.47
Son Ürün zeytin	3.65±0.25	49.19±3.45	0.0042±0.75

BBD deneme desenine göre yapılan tüm uygulamalar kapsamında, nem, renk değişimi, antioksidan madde ve doku özellikleri ile ilgili deneysel verilerin tamamı Tablo 3'de yer almaktadır. Son ürün nemi üzerinde ultrason, dondurma ve kurutmanın etkileri Tablo 2'de yer alan ANOVA tablosunda görülmektedir. Tabloya göre önerilen modeller arasından en uygun modelin kuadratik model olduğu görülmektedir. Tabloya göre elde edilen kuadratik model yüksek R<sup>2</sup> değerlerine sahip (>0.95). "Uyum eksikliği" değeri ise BBD için önemsiz (p>0.05) olarak tespit edilmiştir. Bu durum incelendiğinde; oluşturulan modelin matematiksel olarak uygunluğunun yeterli olduğu; bununla birlikte, gürültü seviyesinden kaynaklanan sapma riskinin de kabul edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Parametrelerin etki büyüklüğü açısından bakıldığında sonikasyon süresi ve kurutma sıcaklığının en önemli varyasyon kaynağı olduğu görülmektedir. Model hakkında tanılayıcı analizler

incelendiğinde, seçilen modelin son ürün nem yüzdesini ifade etme noktasında yeterli seviyede güvenilir olduğu tespit edilmektedir (Şekil 2). Bu amaçla bakılan normal dağılım grafiği, kalıntıların normal dağılım gösterdiğini ifade etmektedir. Tahminlenen değerlerin deneysel veriler ile 45° açı oluşturacak nitelikte örtüştüğü dolayısıyla parametrelerin yanıt üzerine etkilerinin başarılı şekilde temsil edilebildiği görülmektedir. Yapılan değerlendirmeler sonunda uygun görülen model için hesaplanan katsayılar Tablo 2'de verilmektedir.



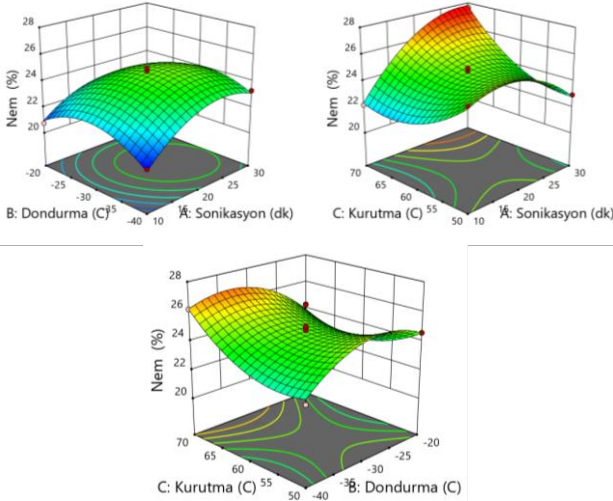
**Şekil 2** Son ürün nem değeri için seçilen modele ait tanılayıcı grafikler

**Tablo 2.** Tüm modellere ait regresyon katsayıları

	%Nem değeri	%DPPH değeri	Renk değişim (ΔE)	Çiğnenebilirlik
Sabit	+24.67	+50.55	+9.76	0.1994
A-Sonikasyon	+0.8881	+5.56	-2.09	-0.0955
B-Dondurma	-0.1774	+6.85	-1.12	2.7595
C-Kurutma	+0.6349	+8.48	+3.31	-6.74425
AB	-0.4478	-13.24	+0.0075	-2.5865
AC	+1.84	-	-1.71	3.9075
BC	-0.9398	+5.53	-3.03	-2.989
A <sup>2</sup>	-1.57	+7.83	-4.50	6.43055
B <sup>2</sup>	-1.54	-	-1.05	-2.36495
C <sup>2</sup>	+1.31	-	+3.20	9.27755

Son ürün nemi üzerinde ultrason süresi ve kurutma sıcaklığının etkili olması beklenen bir durumdur (Şekil 3). Bunun sebebi ultrason ön işlemi ile ilgili yapılan çalışmalarda ultrason etkisi ile ürün kuruma parametrelerinin etkilendiğinin tespit edilmesidir. Birçok çalışma bulgusuna göre sonikasyon süresi arttıkça oluşan doku deformasyonları kuruma hızını artırmaktadır. Aydar tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada yeşil zeytin dilimlerine ultrason (0-5-10

dak ve mikrodalga (180W- 450W- 800W) uygulamalarının bir aradaki etkileri incelenmiş; çalışma sonucunda mikrodalga uygulamasına ön işlem olarak ultrason uygulamasının hem kurutma süresini azalttığı hem de ürün kalitesini arttırdığı tespit edilmiştir [39]. Yine aynı yazar tarafından yapılan başka bir çalışmada da ultrason ön işleminin mikrodalga kurutma üzerine etkisi incelenmiş; çalışmada kullanılan yeşil ve siyah zeytinlerin rehidrasyon yeteneğini arttırdığı ve kalite parametrelerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir [40].



Şekil 3 Nem değeri modeli için YYY grafikleri

Muz meyvesi üzerine yapılan iki farklı çalışmada, kurutma kinetiği üzerine ultrason ön işlemi araştırmak için 25 kHz frekansta ve 30°C’de 10, 20 ve 30 dakika süre boyunca ultrason uygulanmıştır. 2007 yılında Fernandes ve Rodrigues tarafından gerçekleştirilen çalışmada ultrason

uygulamasının ardından 60°C’de kurutma işlemi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda 20 dakika süre ile uygulanan ultrason ön işleminin, kurutma süresinde %10.3 azalma sağladığı gözlemlenmiştir[41]. Azoubel vd. tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise, muz meyvesine ultrason uygulamasının ardından 50°C’de ve 70°C’de kurutma işlemi uygulanmıştır. Çalışma çıktıları incelendiğinde 20 dakikalık ultrason işlemi sonrası 50°C’de kurutma işleminde 138 dakika; 70 °C’de kurutma işleminde ise 5 dakika süre azalma gözlemlenmiştir [42]. Ultrason ön işlemi; papaya meyvesinde %16, ananas meyvesinde yaklaşık %19, jambu meyvesinde %27.3 oranında kurutma süresini azalttığı tespit edilmiş; farklı meyve- sebzeler üzerinde yapılan çalışmalarda da benzer etkiler gösterdiği gözlemlenmiştir [43-47]. Son üründe antioksidan aktivite düzeyi olan %DPPH değerleri (Tablo 3) üzerinde ultrason, dondurma ve kurutmanın etkileri Tablo 4’te yer alan ANOVA tablosunda görülmektedir.

Tablo 4’e göre önerilen modeller arasında en uygun olanın kuadratik model olduğu tespit edilmiştir. “” değeri %DPPH için önemsizdir (p>0.05). Bu durum dikkate alınarak incelendiğinde oluşturulan modelin matematiksel olarak uygunluğunun yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Tanılayıcı grafikleri içeren Şekil 4’e göre tahminlenen değerlerin deneysel veriler ile 45° açı oluşturacak nitelikte örtüştüğü dolayısıyla parametrelerin yanıt üzerine etkilerinin başarılı şekilde temsil edilebildiği ortaya konmuştur. Kalıntıların kabul edilebilir bir seviyede değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Leverage testinde sapmaların 1’den küçük olması modelin deneysel verilerle uyumluluğunu kanıtlamaktadır. Bu durumda kuadratik modelin %DPPH değerlerini tahminlemede yeterli güvenilirlikte olduğu sonucuna varılabilmektedir. Dolayısıyla antioksidan aktivite düzeyi için uygun görülen kuadratik modele ait katsayılar model verileri kullanılarak belirlenmiştir (Tablo 2).

Tablo 3. Denemelere ait sonuçlar

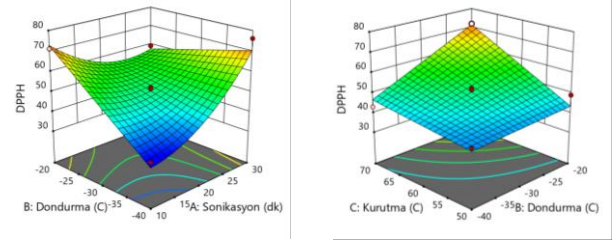
No	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	%DPPH	%Nem	ΔE	Sertlik	Esneklik	Yapışkanlık	Sakazımsılık	Çiğnenebilirlik
1	10	-30	50	40.13	24.91	4.23	1.42	35.01	0.25	15.76	25.63
2	20	-20	50	49.01	24.59	10.96	1.19	36.00	0.09	10.83	19.50
3	20	-40	50	42.18	22.70	7.39	0.99	33.02	0.09	4.77	7.88
4	30	-30	50	50.35	22.96	4.92	2.62	29.42	0.44	30.15	20.00
5	10	-20	60	71.24	20.74	6.01	1.23	32.46	0.16	7.06	10.83
6	10	-40	60	35.22	20.56	8.04	0.55	10.55	0.02	0.31	0.27
7	30	-40	60	76.23	23.28	2.39	0.69	30.74	0.08	1.87	2.87
8	30	-20	60	59.28	21.67	0.39	0.83	28.60	0.10	2.16	3.09
9	10	-30	70	64.67	22.18	15.42	0.72	29.61	0.06	1.83	4.00
10	20	-20	70	71.94	24.30	10.37	0.48	10.12	0.05	0.43	0.36
11	20	-40	70	43.00	26.17	18.90	0.83	10.58	0.04	0.79	0.70
12	30	-30	70	69.91	27.58	9.26	1.26	31.57	0.42	9.43	14.00
13	20	-30	60	51.59	24.93	8.50	0.37	9.91	0.02	0.09	0.08
14	20	-30	60	46.61	24.75	10.64	0.85	10.00	0.03	0.18	0.10
15	20	-30	60	52.40	24.28	9.38	0.80	10.50	0.05	1.05	0.22
16	20	-30	60	51.64	24.39	8.63	0.95	10.09	0.07	1.20	0.50
17	20	-30	60	46.59	25.00	11.64	0.43	10.16	0.02	0.12	0.10



**Tablo 4.** Son ürün DPPH değerlerine ait kuadratik modellerin ANOVA tablosu

Varyasyon kaynağı	Kareler Toplamı	F-değeri	p-değeri
Model	2331.14	16.49	0.0006
A-Sonikasyon	247.33	18.89	0.0034
B-Dondurma	375.79	23.19	0.0019
C-Kurutma	575.84	37.68	0.0005
AB	701.34	42.58	0.0003
AC	6.28	0.4116	0.5416
BC	122.23	7.49	0.0291
A <sup>2</sup>	251.80	15.01	0.0061
B <sup>2</sup>	37.74	2.38	0.1669
C <sup>2</sup>	6.34	0.4163	0.5394
Kalıntı	143.71		
Uyum eksikliği	109.98	4.24	0.0982
Saf Hata	33.73		
Toplam	2474.85		
Ortalama vs Toplam	81619.94		
Lineer vs Ortalama	2034.66	4.57	0.0214
2FI vs Lineer	1287.50	6.68	0.0094
<b>Kuadratik vs 2FI</b>	<b>463.83</b>	<b>6.06</b>	<b>0.0233</b>
Kübik vs Kuadratik	135.86	4.24	0.0982
Değişim Katsayısı %	7.29		
R <sup>2</sup>	0.9550		
Adj R <sup>2</sup>	0.8971		
Pred R <sup>2</sup>	0.4349		
Yeterli kesinlik	12.9480		

Sonikasyon, dondurma ve kurutmanın her birinin önemli parametreler olduğu tespit edilmiş, ayrıca ikili etkiler arasında sonikasyon-kurutmanın bileşke etkisi dışındaki etkileşimler ile sonikasyon ve kurutmanın kuadratik etkileri de önemli bulunmuştur (Tablo 4). Zeytin yaprağında yapılan bir çalışmada ultrason uygulamasının hem fenolik hem antioksidan madde ekstraksiyon verimini arttırdığı dolayısıyla yaprak yüzeyinden daha çok antioksidan uzaklaşmasına imkan sağladığı belirlenmiştir [48].

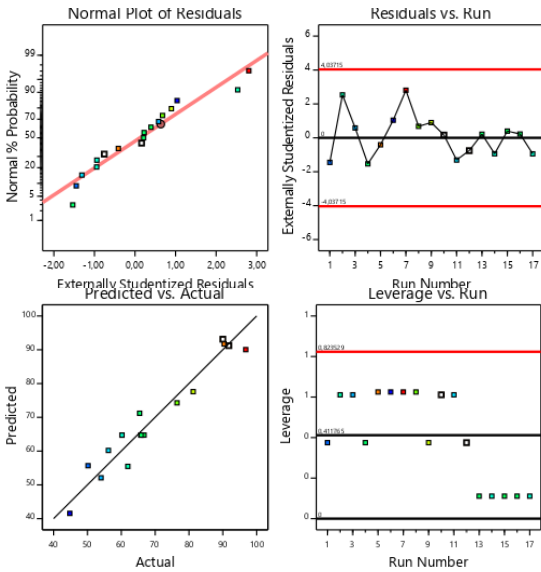


**Şekil 5** %DPPH değeri modeli için YYY grafikleri

Son ürün fiziksel özellikleri arasında belirleyici yanıtlar arasında yer alan ürün renk değeri değişimi üzerinde ultrason, dondurma ve kurutmanın etkileri Tablo 5'te yer alan ANOVA tablosunda verilmiştir.

**Tablo 5.** Son ürün renk değerlerine ait kuadratik modelin ANOVA tablosu

Varyasyon kaynağı	Kareler Toplamı	F-değeri	p-değeri
<b>Model</b>	<b>308.51</b>	<b>16.79</b>	<b>0.0006</b>
A-Sonikasyon	35.03	17.16	0.0043
B-Dondurma	10.10	4.95	0.0615
C-Kurutma	87.45	42.83	0.0003
AB	0.0002	0.0001	0.9919
AC	11.73	5.75	0.0477
BC	36.60	17.93	0.0039
A <sup>2</sup>	85.20	41.73	0.0003
B <sup>2</sup>	4.65	2.28	0.1750
C <sup>2</sup>	43.09	21.11	0.0025
Kalıntı	14.29		
Uyum eksikliği	6.97	1.27	0.3977
Saf Hata	7.32		
Toplam	322.80		
Ortalama vs Toplam	1272.23		
Lineer vs Ortalama	132.58	3.02	0.0682
2FI vs Lineer	48.33	1.14	0.3812
<b>Kuadratik vs 2FI</b>	<b>127.60</b>	<b>20.83</b>	<b>0.0007</b>
Kübik vs Kuadratik	6.97	1.27	0.3977
Değişim Katsayısı %	16.52		
R <sup>2</sup>	0.9557		
Adj R <sup>2</sup>	0.8988		
Pred R <sup>2</sup>	0.6191		
Yeterli kesinlik	16.7543		

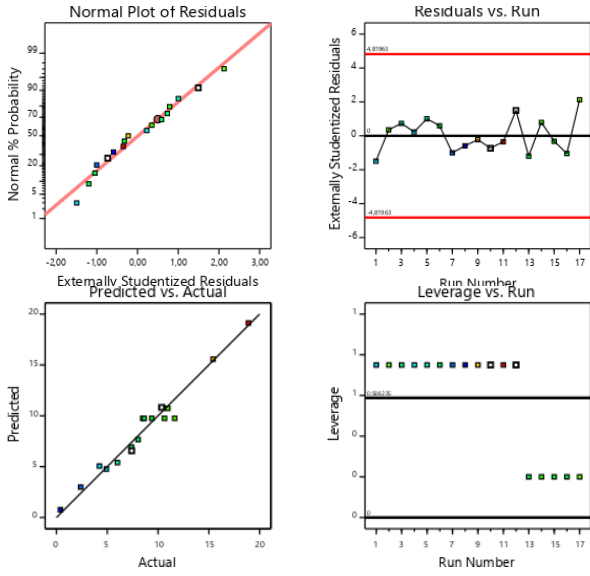


**Şekil 4** Son ürün %DPPH değeri için seçilen modele ait tanılayıcı grafikler

Sonikasyon süresi, dondurma sıcaklığı ve kurutma sıcaklığının %DPPH üzerine etkilerini gösteren yüzey grafikleri ve kontör grafikleri Şekil 5'te verilmektedir.

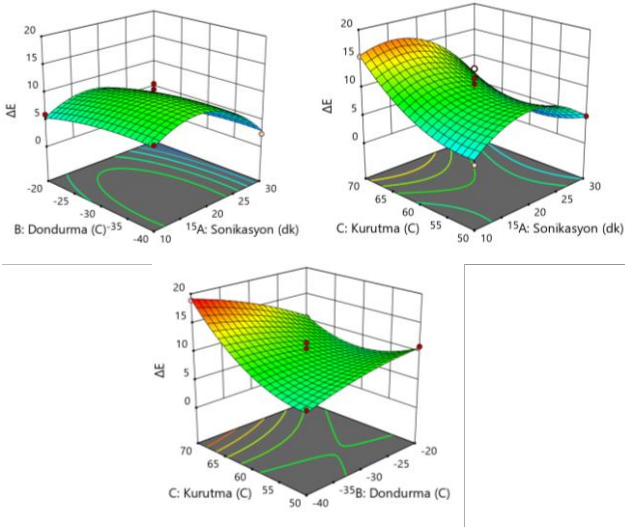
Tabloya göre önerilen modeller arasından en uygun modelin kuadratik model olduğu bulunmuştur. Ayrıca elde edilen kuadratik model yüksek  $R^2$  değerlerine sahiptir ( $>0.95$ ). Ancak “uyum eksikliği” değeri bu model için önemsizdir ( $p>0.05$ ). Oluşturulan model, matematiksel olarak uygunluğu yeterli, gürlü seviyesinden kaynaklanan sapma riskinin de kabul edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca tahminlenen değerlerin deneysel veriler ile  $45^\circ$  açı oluşturacak nitelikte örtüştüğü dolayısıyla parametrelerin yanıt üzerine etkilerinin başarılı şekilde temsil edilebildiği grafikte görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 6 Son ürün renk değişim değeri için seçilen modele ait tanılayıcı grafikler

Parametrelerin etki büyüklüğü açısından bakıldığında sonikasyon süresi ve kurutma sıcaklığının en önemli varyasyon kaynağı olduğu görülmektedir (Tablo 5, Şekil 7).



Şekil 7 Renk değişim değeri modeli için YYY grafikleri

Gemlik çeşidi zeytinler üzerine yapılan bir çalışmada, ham zeytinler 3 gruba ayrılıp 7 gün boyunca ilk grup işlemsiz, ikinci grup sadece ultrason, üçüncü grup ise ultrason+ozon uygulamasına tabii tutulmuştur. Ardından 2 farklı karakterde hazırlanan salamura çözeltilerinde fermantasyona bırakılmış ve her aşamada renk değişimleri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda parlaklık değeri ( $L^*$ ) üzerine salamura çözeltilerinin, muamele tipinin (ultrason veya ultrason+ozon uygulaması) veya muamele tipi ile salamura çözeltilerinin kombinelerinin herhangi bir etkisi bulunmadığı gözlemlenmiştir. Kırmızılık-yeşillik(a) ve sarılık-mavilik(b) değerleri incelendiğinde ise; salamura bileşimi, geçen süre ve muamele tipleri (sadece ultrason veya ultrason+ozon uygulaması) arasındaki tekli, ikili ve üçlü kombinasyonların hepsinin etkisi önemli bulunmuştur [49]. Kayguluoğlu (2018) tarafından yapılan çalışmada ise farklı senelerde (2016-2017) hasat edilen Gemlik çeşidi siyah zeytinler üzerinde iki farklı sıcaklık ( $-18^\circ\text{C}$  ve  $-25^\circ\text{C}$ ) ve iki farklı dondurma uygulaması (depolama ve bireysel hızlı dondurma- IQF) incelenmiştir. Örneklerin renkleri kendi içinde siyah, siyah-gri, gri-kahverengi, kahverengi-açık kahverengi ve açık kahverengi olarak kategorilendirilmiş ve dondurma uygulamalarının ve depolama sıcaklığının renk üzerine etkisi istatistiksel olarak önemli bulunmuştur.

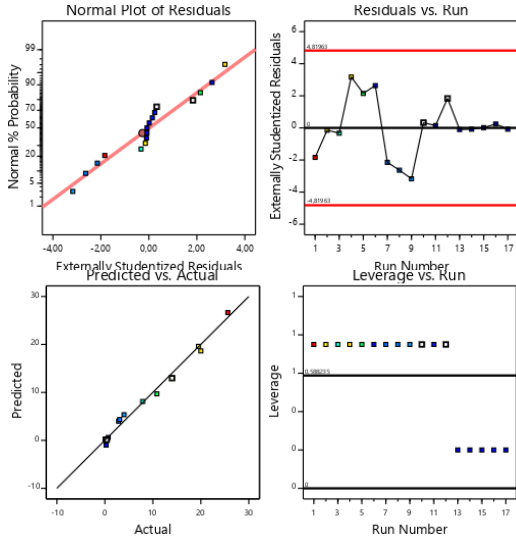
Son ürün doku özelliklerinden sertlik, esneklik, yapışkanlık, sakızimsılık ve çignenebilirlik değeri üzerinde ultrason, dondurma ve kurutmanın etkileri Tablo 6’da yer alan ANOVA tablosunda görülmektedir.

Model uygunluğu açısından çignenebilirlik için geliştirilen model yeterli güvenilirlikte bulunmuş olup Tablo 6’da modellere ve diğer değerlere ait önem dereceleri verilmiştir. Bu durumda sertlik, esneklik ve yapışkanlık üzerinde kurutma sıcaklığının en önemli faktör olduğu ( $p<0.05$ ), ayrıca yapışkanlık üzerinde de sonikasyon süresinin dikkate alınır bir etkisi olduğu görülmektedir. Tablo 6’ya göre çignenebilirliğin tanımlanması açısından önerilen modeller arasından en uygunu kuadratik model olarak görülmektedir. Ayrıca tabloya göre elde edilen kuadratik model sadece çignenebilirlik özelliği için yüksek  $R^2$  değerlerine sahiptir ( $>0.95$ ). Sertlik, esneklik, sakızimsılık ve yapışkanlık özellikleri için ise lineer modelin daha uygun olabileceği düşünülmektedir. “uyum eksikliği” değeri incelendiğinde; çignenebilirlik, esneklik, sakızimsılık ve yapışkanlık değerleri için kritik seviyede önemli ( $p<0.05$ ), sertlik için ise kısmen önemsiz olduğu ( $p>0.05$ ) tespit edilmiştir. Bu durum oluşturulan modellerin hiçbirinin yeterli güvenilirlikte olmadığını, dolayısıyla modellerden kaynaklı uyumsuzluk sebebiyle parametrelerden bağımsız varyasyonlar oluşabileceğini göstermektedir. Araştırmannın hedefini sağlamak adına çignenebilirliğe ait modelin tanılayıcı grafikleri daha detaylı incelenmiştir.

Tanılayıcı grafikleri içeren Şekil 8’e göre çignenebilirlik için tahminlenen değerlerin deneysel veriler ile  $45^\circ$  açı oluşturarak örtüştüğü dolayısıyla parametrelerin yanıt üzerine etkilerinin başarılı şekilde temsil edilebildiği grafikte görülmektedir.

**Tablo 6.** Son ürün doku değerlerine ait kuadratik modellerin ANOVA tablosu

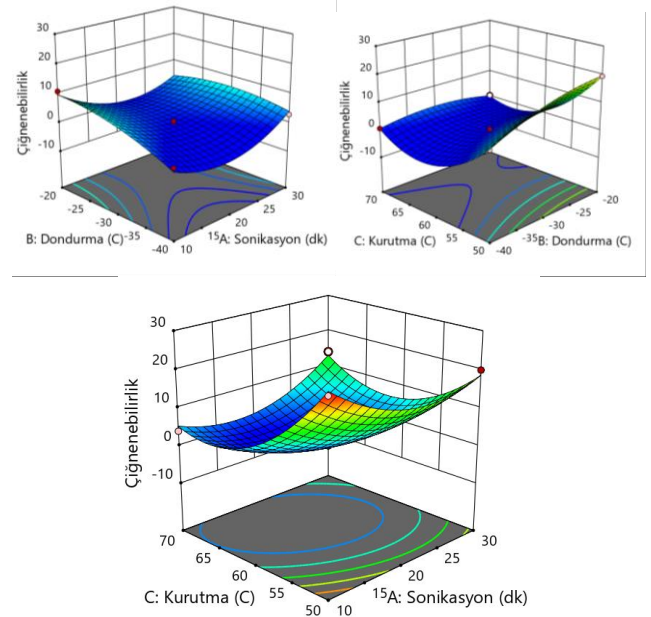
Varyasyon kaynağı	Çiğnenebilirlik			Sertlik	Esneklik	Sakızmsılık	Yapışkanlık
	Kareler Toplamı	F-değeri	p-değeri	p-değeri	p-değeri	p-değeri	p-değeri
Model	1122.40	74.86	< 0.0001	0.1253	0.0448	0.0222	0.0456
A-Sonikasyon	0.0730	0.0438	0.8402	0.2206	0.5404	0.1740	<b>0.0504</b>
B-Dondurma	60.92	36.57	<b>0.0005</b>	0.5647	0.2961	0.3359	0.4898
C-Kurutma	363.88	218.44	< 0.0001	<b>0.0327</b>	<b>0.0348</b>	<b>0.0053</b>	0.2608
AB	26.76	16.06	0.0051	0.5138	0.1286	0.4835	0.4926
AC	61.07	36.66	0.0005	0.4277	0.6055	0.4616	0.3424
BC	35.74	21.45	0.0024	0.5055	0.8122	0.4855	0.9622
A <sup>2</sup>	174.11	104.52	< 0.0001	0.0788	0.0088	0.0223	0.0107
B <sup>2</sup>	23.55	14.14	0.0071	0.2376	0.3723	0.1104	0.0685
C <sup>2</sup>	362.41	217.56	< 0.0001	0.0550	0.0323	0.0092	0.0204
Kalıntı	11.66						
Uyum eksikliği	11.54	122.43	0.0002	0.1167	< 0.0001	0.0002	0.0049
Saf Hata	0.1256						
Toplam	1134.07						
Ortalama vs Toplam	713.51	2.60	0.0970	0.1616	0.3785	0.1051	0.4343
Lineer vs Ortalama	424.87	0.7034	0.5714	0.8196	0.7750	0.9080	0.9196
2FI vs Lineer	123.57	<b>114.85</b>	< 0.0001	<b>0.0693</b>	<b>0.0133</b>	<b>0.0109</b>	<b>0.0102</b>
<b>Kuadratik vs 2FI</b>	<b>573.96</b>	122.43	0.0002	0.1167	< 0.0001	0.0002	0.0049
Küçük vs Kuadratik	11.54	2.60	0.0970	0.1616	0.3785	0.1051	0.4343
Değişim Katsayısı %	19.92			40.79	32.21	84.7	69.98
R <sup>2</sup>	0.9897			0.7590	0.8317	0.8664	0.8307
Adj R <sup>2</sup>	0.9765			0.4492	0.6153	0.6947	0.6131
Pred R <sup>2</sup>	0.8371			-1.9444	-1.6916	-1.1201	-1.5819
Yeterli kesinlik	27.9223			6.0217	5.2340	8.1181	6.3467



**Şekil 8** Çiğnenebilirlik değeri için seçilen modele ait tanılayıcı grafikler

Ayrıca kalıntıların belirli bir seviyede değişkenlik göstermesine karşın Leverage testinde sapmaların 1'den küçük olması modelin deneysel verilerle uyumluluğunu göstermekte ve bu durum modelin yeterli seviyede güvenilir olduğunu ispatlamaktadır. Yapılan değerlendirmeler

sonunda uygun görülen model için hesaplanan katsayılar Tablo 2'de, yüzey grafikleri ise Şekil 9'da verilmektedir.



**Şekil 9** Çiğnenebilirlik değeri modeli için YYY grafikleri

2016 ve 2017 yıllarında hasat edilen Gemlik çeşidi siyah zeytinler üzerinde yapılan çalışmada zeytinlere iki farklı dondurma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Hasat bölgeleri aynı olmasına rağmen seneleri farklı olduğu için 2016 hasat yılında temin edilen zeytinlere uygulama yapıldıktan sonra, tane etinde yumuşama ve kabuk ayrılması gözlemlendiği için 2017 hasat yılında temin edilen zeytinlere dondurma uygulaması ön işlemleri olarak 15 saat boyunca 0.5% CaCl<sub>2</sub> içerikli solüsyonda bekletilmiştir. Her iki hasat dönemindeki zeytinlerin bir kısmı -18°C ve -25°C depolarda, diğer kısmı ise yine aynı sıcaklıklara IQF (bireysel hızlı dondurucu) kullanılarak dondurulmuştur. Ardından tüm zeytinler 90 gün depolanıp salamura ve yağlı sele olarak işlenmiştir. Zeytinlerin dokusu kesme kuvveti üzerinden incelenmiş ve araştırma sonucunda tıpkı bu çalışmada da olduğu gibi dondurma uygulamasının sertlik üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır [18]. Bu durum kurutma öncesinde uygulanan çözdürme işlemi ve sonrasında kurutma ile yapıda oluşan sıkışmanın sadece dondurma etkisi ile olacak dokusal farklılığın gölgelemesi şeklinde yorumlanabilir.

#### 4 Sonuç

Çalışmada kullanılan çekirdeği çıkarılmış Edremit çeşidi zeytinlerin Uluslararası Zeytin Konseyi'nin belirlediği yöntem ile olgunlaşma indeksi 3.43 olarak tespit edilmiştir bu değer olgun zeytin sınıfına karşılık gelmektedir. Bu çalışmada ham örneklerde L\* değeri 21.58, a\* değeri 3.03, b\* değeri 1.97, RI değeri 0.229 olarak tespit edilmiştir. Mekanik doku özellikleri hesaplandığında; Sertlik 0.494 N, esneklik 1.025, yapışkanlık 1.029, sakızimsılık 0.508 ve çignenebilirlik 0.521 olarak ölçülmüştür. Ayrıca ham zeytinlerin nem içeriği %60.13±0.15, kül içeriği %1.43±0.03, protein içeriği %2.22±0.55, yağ içeriği ise kuru temelde %31.43±1.15 olarak tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında, ultrason uygulaması, farklı sıcaklıklarda dondurma işlemi ve farklı sıcaklıklarda kurutma işlemi gibi birtakım fiziksel uygulamalar, yüzey yanıt yöntemi ile oluşturulmuş deneme deseni kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen ANOVA tabloları ile parametrelerin kuru zeytin kalite özelliklerinden nem, %DPPH, renk ve dokusal özellikleri üzerindeki etkileri modellenmiştir. Bu kapsamda belirtilen kalite özelliklerinin, geliştirilen kuadratik modellerle yeterli güvenilirlikte tanımlanabildikleri ortaya konulmuştur. İşlenmiş zeytinlerde son ürün nem değeri üzerinde sonikasyon süresi ve kurutma sıcaklığının ve etkileşimlerinin önemli ölçüde değişkenlik sağladığı tespit edilirken; %DPPH değerinde tüm faktörler etkili olmaktadır. Ayrıca kuru zeytin fiziksel özellikleri analiz edildiğinde, renk değişimi üzerinde en önemli etki sonikasyon süresi ve kurutma sıcaklığı iken, dokusal özelliklerin genelinde kurutma sıcaklığı en önemli faktör niteliği kazanmaktadır. Tüm bu durumlar dikkate alındığında yeni bir ürün olarak kuru zeytin üzerinde sonikasyon süresi, dondurma sıcaklığı ve kurutma sıcaklığı gibi fiziksel uygulamalar hem fiziksel hem de kimyasal özellikler üzerinde etki göstermektedir.

#### Teşekkür

Bu makale TÜBİTAK 1200310 numaralı proje kapsamında üretilen veriler kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışma materyali olan zeytin meyvelerinin tedariki Aydar Zeytincilik Ltd. Şti. tarafından sağlanmıştır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %3

#### Kaynaklar

- [1] G. N. Kara, Z. Y. Özbaş, Sofralık zeytin üretiminde doğal maya florasının önemi. *Gıda*, 38 (6), 375–382, 2013. <https://doi.org/10.5505/gida.2013.08108>.
- [2] M. T. Özkaya, R. Tunahoğlu, Ş. Eken, M. Ulaş, M. Tan, A. Danacı, N. İnan ve Ü. Tibet, Türkiye zeytinciliğinin sorunları ve çözüm önerileri. *Türkiye Ziraat Mühendisliği VII. Teknik Kongresi*, sayfa 1–27, Ankara, Türkiye, 11-15 Ocak 2010.
- [3] E. Sakar, B. E. Ak ve İ. Odabaşoğlu, Güneşin doğduğu Harran'da güneş bitkisi zeytin yeniden doğuyor, Şanlıurfa, Türkiye, Fizibilite raporu. 2020.
- [4] Ş. Irmak, F. Öztürk Güngör ve E. Susamcı, Bazı sofralık zeytin çeşitlerimizin toplam fenolik madde miktarları ve işleme tekniklerinin bu bileşikler üzerine etkileri. *Zeytin Bilim*, 1 (2), 57–64, 2010.
- [5] V. Uylaşer, İ. Şahin, Salamura siyah zeytin üretiminde geleneksel gemlik yönteminin günümüz koşullarına uyarlanması. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 18 (1), 105–113, 2004.
- [6] A. Y. Aydar, T. Öncü Öner ve E. F. Üçok, Effects of hydroxytyrosol on human health. *EC Nutrition*, 11 (4), 147–157, 2017.
- [7] G. Yıldız, V. Uylaşer, Doğal bir antimikrobiyel: Oleuropein. *Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25 (1), 131–142, 2011. <https://doi.org/10.20479/uuzfd.44959>.
- [8] S. Charoenprasert, A. Mitchell, Factors influencing phenolic compounds in table olives (*Olea europaea L.*). *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 60 (29), 7081–7095, 2012. <https://doi.org/10.1021/jf3017699>.
- [9] M. Habibi, M. T. Golmakani, G. Mesbahi, M. Majzoobi and A. Farahnaky, Ultrasound-accelerated debittering of olive fruits. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 31, 105–115, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.06.014>.
- [10] M. Habibi, M. T. Golmakani, A. Farahnaky, G. Mesbahi and M. Majzoobi, NaOH-free debittering of table olives using power ultrasound. *Food Chemistry*, 192, 775–781, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.086>.
- [11] E. Taş, Ü. Seven ve Ş. Güçer, Zeytin işleme teknolojilerinde kalite beklentileri. *I. Ulusal Zeytin Öğrenci Kongresi*, sayfa 132–135, Edremit-Balıkesir, Türkiye, 17-18 Ekim 2019.
- [12] A. Baysal, Tuz tüketimi ve sağlık. *Beslenme ve Diyet Dergisi*, 44 (3), 194–195, 2016.
- [13] Y. Erdem, Tuz tüketimi, vücuttaki dağılımı ve hipertansiyon patogeneziindeki yeri. *Hipertansiyon*



- Haber Bülteni, 3 (5), 5–6, 2016.
- [14] A. Deryaoğlu, Şalgam suyu üretiminde NaCl yerine KCl kullanarak sodyum miktarını azaltma olanakları. *Gıda*, 30 (5), 335–341, 2005.
- [15] TKG. Sofralık zeytin tebliği, Türk Gıda Kodeksi Yönetmeliği, Tebliğ No: 2014/33, T.C. Resmi Gazete Sayı: 29097, 2014.
- [16] S. Tuna, Siyah sofralık zeytin fermantasyonunda alkali ve enzimatik yöntemlerin fiziko-kimyasal özellikler üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [17] A. R. Ergün, T. Baysal ve H. Bozkır, Ultrases yöntemi ile karatenoitlerin ekstraksiyonu. *Gıda*, 38 (4), 239–246, 2013. <https://doi.org/10.5505/gida.2013.30074>.
- [18] A. Kayguloğlu, Sofralık siyah zeytin kalitesi üzerine acılık giderme işlemlerinin etkisi. Doktora Tezi, T.C. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [19] J. M. García, K. Yousfi, R. Mateos, M. Olmo and A. Cert, Reduction of oil bitterness by heating of olive (*Olea europaea*) fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49 (9), 4231–4235, 2001. <https://doi.org/10.1021/jf001302n>.
- [20] AOAC. Official Methods of Analysis. Method 971.28, 2000.
- [21] AOAC. Official Methods of Analysis. Method 992.23, 1998.
- [22] AOAC. Official Methods of Analysis. Method 920.39, 2000.
- [23] AOAC. Official Methods of Analysis. Method 940.26, 2000.
- [24] AOAC. Official Methods of Analysis. Method 937.09 2013.
- [25] K. Yousfi, J. A. Cayuela and J. M. García, Reduction of virgin olive oil bitterness by fruit cold storage, *Journal of Agriculture Food Chemistry*, 56 (21), 10085–10091, 2008. <https://doi.org/10.1021/jf801951g>.
- [26] B. Erbay, I. Üçgül, S. Küçüksayan ve E. Küçüköner, Physical, sensorial, color and rehydration properties of dried green olive slices. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 14 (3), 246–250, 2010.
- [27] I. Pradas, B. Del Pino, F. Peña, V. Ortiz, J. M. Moreno-Rojas, A. Fernández-Hernández and J.A. García-Mesa, The use of high hydrostatic pressure (HHP) treatments for table olives preservation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 13, 64–68, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.10.011>.
- [28] D. M. R. Georget, A. C. Smith and K. W. Waldron, Effect of ripening on the mechanical properties of Portuguese and Spanish varieties of olive (*Olea europaea* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81, 448–454, 2001. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(200103\)81:4<448::AID-JSFA832>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1097-0010(200103)81:4<448::AID-JSFA832>3.0.CO;2-0).
- [29] B. Lanza, F. Amoroso, Measurement of kinaesthetic properties of in-brine table olives by microstructure of fracture surface, sensory evaluation and texture profile analysis (TPA). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98 (11), 4142–4150, 2018. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8932>.
- [30] K. Batçioğlu, *Olea europaea* (zeytin) ailesinden Hatay yöresine özgü “Halhalı” türünün meyve, yaprak ve çekirdek ekstraktlarının antioksidan ve antitrombotik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, T.C. İnönü Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [31] S. Kara, Farklı kurutma yöntemlerinin zeytin yaprağındaki fenolik madde dağılımına ve antioksidan kapasitesine etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2013.
- [32] I. Elksibi, W. Haddar, M. B. Ticha, R. Elgharbi and M. F. Mhenni, Development and optimisation of a non conventional extraction process of natural dye from olive solid waste using response surface methodology (RSM). *Food Chemistry*, 161, 345–352, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.108>.
- [33] J. Prakash Maran, S. Manikandan, Response surface modeling and optimization of process parameters for aqueous extraction of pigments from prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) fruit. *Dyes and Pigments*, 95, 465–472, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2012.06.007>.
- [34] L. Mei, W. Zhen-Chang, D. Hao-Jie, C. Li, X. Qing-Gang and L. Jing, Response surface optimization of polysaccharides extraction from *Liriope* roots and its modulatory effect on Sjogren syndrome. *International Journal of Biological Macromolecules*, 45 (3), 284–288, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.06.010>.
- [35] P. S. Milić, K. M. Rajković, O. S. Stamenković and V. B. Veljković. Kinetic modeling and optimization of maceration and ultrasound-extraction of resinoid from the aerial parts of white lady’s bedstraw (*Galium mollugo* L.). *Ultrason Sonochemistry*, 20 (1), 525–534, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.017>.
- [36] A. Akça Uçkun, U. Aksoy, Manisa (Ahmetli) Bölgesinde Ayvalık (Edremit) zeytin (*Olea europaea* L.) çeşidinin, farklı yükseklik ve farklı hasat zamanlarının meyve ve zeytinyağı kalitesine etkileri. 2.Uluslararası Gıda, Tarım ve Veteriner Bilimleri Kongresi, sayfa 101–111, Konya, Türkiye, 2020.
- [37] D. Sevim, Ö. Tuncay, Ayvalık ve Memecik zeytin çeşitlerinin yaprağı ve meyvelerinin toplam fenolik madde miktarı ve antioksidan aktiviteleri. *Gıda*, 37 (4), 219–226, 2012.
- [38] K. Tanılğan, M. M. Özcan and A. Ünver, Physical and chemical characteristics of five Turkish olive (*Olea europaea* L.) varieties and their oils. *Grasas y Aceites*, 58 (2), 142–147, 2007. <https://doi.org/10.3989/gya.2007.v58.i2.78>.
- [39] A. Y. Aydar, Quality parameters and drying kinetics of ultrasound pretreated fermented black table olives. *Latin American Applied Research*, 50 (4), 271–276, 2020. <https://doi.org/10.52292/j.laar.2020.492>.
- [40] A. Y. Aydar, Investigation of ultrasound pretreatment

- time and microwave power level on drying and rehydration kinetics of green olives. *Food Science and Technology*, 41 (1), 238–244, 2021. <https://doi.org/10.1590/fst.15720>.
- [41] F. A. N. Fernandes, S. Rodrigues, Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, 82 (2), 261–267, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.032>.
- [42] P. M. Azoubel, M. D. A. M. Baima, M. D. A. R. Amorim and S. S. B. Oliveira, Effect of ultrasound on banana cv Pacovan drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 97 (2), 194–198, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.009>.
- [43] S. Tüfekçi, S. G. Özkal, Application of ultrasound in food drying. *Pamukkale University Journal Engineering and Science*, 21 (9), 408–413, 2015. <https://doi.org/10.5505/pajes.2015.05902>.
- [44] F. A. N. Fernandes, F. I. P. Oliveira and S. Rodrigues, Use of ultrasound for dehydration of papayas. *Food and Bioprocess Technology*, 1 (4), 339–345, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0019-9>.
- [45] F. A. N. Fernandes, M. I. Gallão and S. Rodrigues, Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90 (2), 186–190, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.021>.
- [46] F. I. P. Oliveira, M. I. Gallão, S. Rodrigues and F.A.N. Fernandes, Dehydration of Malay Apple (*Syzygium malaccense* L.) using ultrasound as pre-treatment. *Food and Bioprocess Technology*, 4 (4), 610–615, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0351-3>.
- [47] A. Y. Aydar, T. Yılmaz, C. Mataracı ve T. Sağlam, Gıdaların kurutulmasında ultrason ön işleminin kullanımı. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (2), 1165–1175, 2021. <https://doi.org/10.21597/jist.775565>.
- [48] I. Khemakhem, M. H. Ahmad-Qasem, E. B. Catalán, V. Micol, J. V. García-Pérez, M. A. Ayadi and M. Bouaziz, Kinetic improvement of olive leaves' bioactive compounds extraction by using power ultrasound in a wide temperature range. *Ultrason Sonochemistry*, 34, 466–473, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.010>.
- [49] E. Yıldız, Gemlik çeşidi siyah sofralık zeytinlerin işlenmesinde ultrases ve ozon uygulamalarının etkileri. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.





# Karayolu esnek yol üstyapılarında görülen yüzey bozulma türlerinin sürüş konforuna etkilerinin değerlendirilmesi

## Evaluation of the effects of surface distress types observed in the flexible road pavements on the ride comfort

Ufuk Kırbas<sup>1,\*</sup> , Mustafa Karashahin<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55200, Samsun Türkiye

<sup>2</sup> İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34840, İstanbul, Türkiye

### Öz

Çalışmada, bitümlü sıcak karışım üstyapılarda oluşan yüzey bozulmaları ile taşıt içerisinde maruz kalınan titreşim değerleri arasındaki benzerlikler araştırılmıştır. Bu amaçla, 98 adet kesimde yüzey bozulma verileri incelenmiş ve Paver sistemine göre analiz edilmiştir. Her bir bozulmanın türü, şiddeti ve miktarına göre üstyapı performansı üzerine olan olumsuz etkisi düşülen değer (DD) yaklaşımı ile normalize edilmiştir. Ayrıca üstyapı kesimlerinin mevcut performansını ifade eden Üstyapı Durum İndeksi (PCI) değerleri hesaplanmıştır. Ardından araç içerisinde sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön yolcu koltuğu olmak üzere üç farklı noktaya yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla aynı kesimlerde düşey doğrultudaki titreşim verileri kaydedilmiş ve ISO 2631-1 kodlu standarda göre analiz edilerek titreşim değerlendirme parametreleri elde edilmiştir. Taşıt içerisinde üç farklı noktada maruz kalınan titreşim parametreleri ile bozulmaları ifade eden DD verileri arasındaki benzerlik değerleri araştırılmış ve kesimlerin PCI ile titreşim parametreleri arasındaki değişimler görselleştirilmiştir. Yama ve çökme türü bozulmaların diğerlerine nazaran sürüş konforu üzerinde daha fazla olumsuz etkisinin olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Esnek üstyapı, Sürüş konforu, Titreşim, Korelasyon

### 1 Giriş

Üstyapılarda hizmet düzeyi, yol kullanıcılarına istenen seviyede hizmet sunma kabiliyetini ifade etmektedir. Hizmet düzeyi, düzgün, konforlu ve güvenli sürüş sağlamak gibi üstyapıların her bir yapım amacı için ayrı ayrı tanımlanmaktadır [1]. Sürüş kalitesi ise taşıtla yapılan bir seyahatin tüm deneyiminin (hareket ortamı ve diğer faktörler dahil olmak üzere) sürücü ve yolcular tarafından algılanıp derecelendirildiği bir kavramdır [2]. Üstyapı Yönetim Sistemi (ÜYS) teorisinin geliştirilmeye başlandığı yıllarda, uzmanlar tarafından karayolu üstyapılarının servis yeteneklerinin, sürüş konforunu temel alan panel değerlendirmelerle yapıldığı bilinmektedir. Fakat değerlendiren kişi her ne kadar konusunda uzman olsa da insan değerlendirmesi sırasında mutlak benzer sonuçlar

### Abstract

The study investigated the similarities between the surface distresses in the bituminous hot mix pavements and the vibration values exposed in the vehicle. To this end, surface distress data in 98 sections were examined and analyzed according to the Paver system. The adverse effect on pavement performance was normalized with the deducted value (DD) approach according to the type, severity, and amount of each distress. In addition, the Pavement Condition Index (PCI) values expressing the current performance of the pavement sections were calculated. Then, with the help of accelerometers placed at three different points in the vehicle, namely the driver's seat, the middle axle and the right front passenger seat, vertical vibration data in the same sections were recorded and analyzed according to the ISO 2631-1 coded standard, and vibration evaluation parameters were obtained. The similarity values between the vibration parameters exposed at three different points in the vehicle and the DD data expressing the deterioration were investigated, and the changes between the PCI and vibration parameters of the sections were visualized. It has been observed that patching and depression type distresses negatively affect ride comfort than others.

**Keywords:** Flexible pavement, Ride comfort, Vibration, Correlation

üretilememesinden dolayı gelişim sürecinde kısıtları kurallarla tanımlanmış objektif sonuçlar verebilme kabiliyetine sahip muhtelif değerlendirme indeksleri ortaya çıkmıştır [3].

Ekonomik olması münasebetiyle üstyapının mevcut performansını belirlemede sıkça yüzey bozulma verilerinin tercih edildiği görülmektedir. Yüzey bozulma verilerini kullanarak geliştirilen indeksler arasında ağırlıklı olarak tercih edilenlerin üstyapı durum indeksi (PCI), üstyapı durum oranı (PCR), üstyapı yüzey değerlendirme ve oranlama sistemi (PASER) ve kalan servis ömrü (RSL) indekslerinin olduğu yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır [4-7]. Bunun yanında değerlendirme kriterlerinin geliştirildiği süreçte, yüzey profilinin bir türevi olan yüzey düzgünlüğü ile ilişkili olarak da çok sayıda indeks ortaya

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ufuk.kirbas@omu.edu.tr (U. Kırbas)

Geliş / Received: 20.09.2021 Kabul / Accepted: 24.03.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.998065

çıkılmıştır [1]. Değerlendirme kriterlerinin net olarak ortaya konulamaması, otoritelerce edinilen bilgi paylaşımlarının sağlanamaması gibi nedenlerle üstyapı düzgünlüğünün tüm dünyada standart haline getirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu anlayış sonucunda uluslararası düzgünlük indeksi (IRI) değerlendirme bileşeni geliştirilmiştir [8, 9].

Yapılan çalışmalardan araştırmacıların sıklıkla yüzey bozulma verileri (çatlaklar, deformasyonlar vb.) ile yüzey düzgünlüğü arasındaki ilişkileri değerlendirebilen modeller üzerinde yoğunlaştığını göstermektedir. İlişkileri ortaya koyan bu modellerin yapay sinir ağları, bulanık mantık, veri madenciliği vb. ileri seviye matematik modelleme teknikleri kullanılarak oluşturulduğu görülmektedir. Esnek üstyapı bozulmaları ile IRI arasındaki ilişkileri ortaya koyan modellerin literatürde en sık karşılaşılan çalışma konusu olduğu açıklıkla görülmektedir [10-13].

Literatürde yüzey bozulma türlerinin üstyapıların performansını ifade etmede kullanılan sayısal gösterimler (indeks vb.) üzerindeki ağırlıklarını ya da etki derecelerini gösteren çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Kırbaş vd. timsah sırt çatlak, yama, ondülasyon ve çökmenin de aralarında bulunduğu 13 adet bozulma türünün bozulma şiddetlerini de dikkate alacak şekilde IRI üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir [14]. Literatürde yüzey bozulma türlerinin mevcut performans gösterimini ifade etmede kullanılan performans indeksi, pürüzlülük ifadesi, konforsuzluk değeri gibi sayısal gösterimler üzerindeki tekil etkilerinin araştırıldığı çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır.

Aliyman bir yol kesiminde standart binek otomobil için üstyapının mevcut performansı ve sürüş hızı sürüş konforunu etkileyen en önemli iki anahtar faktördür [15]. Özellikle düşey eksen doğrultusunda taşıt içerisinde maruz kalınan titreşimlerin ana sebeplerinin taşıtın mekanik yapısı ve taşıtın seyahat ettiği yolda görülen yüzey bozulmaları olduğu bilinmektedir [16].

Çalışmada, sınırları belirlenmiş bir bitümlü sıcak karışım (BSK) yol üstyapısı kesiminde oluşan yüzey bozulmaları ile taşıt içerisinde maruz kalınan titreşim değerleri arasındaki benzerlikler araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı performans seviyelerinde 20 adet karayolu esnek üstyapısında 98 adet farklı yol kesimde yüzey bozulma verileri kayıt edilmiştir. Bozulmalar esasları ASTM D 6433 kodlu standartta tanımlanan Paver sistemine göre analiz edilmiş ve üstyapıların mevcut performansları üzerine olumsuz etkileri belirlenmiştir. Her bir bozulmanın türü, şiddeti ve miktarına göre üstyapı performansı üzerine olan olumsuz etkisini aynı eşdeğerde karşılaştırabilmek diğer bir değişle normalize etmek için düşülen değer (DD) (deduct value) yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca üstyapı kesimlerinin mevcut performansını ifade eden PCI değerleri hesaplanmıştır. Ardından araç içerisinde sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön yolcu koltuğu olmak üzere üç farklı noktaya yerleştirilen ivmeölçerler yardımıyla aynı yollarda düşey doğrultudaki titreşim verileri kaydedilmiştir. Veriler ISO 2631-1 kodlu standartta açıklanan prensiplere göre analiz edilerek titreşim değerlendirme parametre değerleri elde edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında her bir üstyapı kesimi

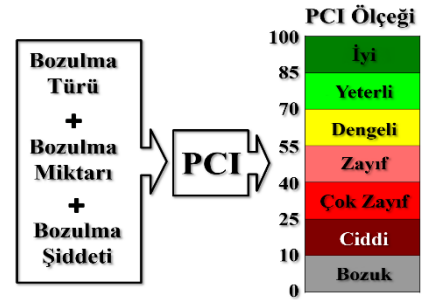
için taşıt içerisinde üç farklı noktada üretilen titreşim parametreleri ile bozulmaları ifade eden DD verileri arasındaki benzerlik değerleri araştırılmıştır. Değerlendirmelerde her bir bozulma türü dikkate alındığı gibi yük, iklim ve diğer sebepler olmak üzere üç farklı bozulma nedenine göre bozulma türleri gruplanarak da değerlendirmeler tekrarlanmıştır. Ayrıca kesimlerin PCI değerleri ile titreşim parametreleri arasındaki değişim grafikler aracılığıyla açıklanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

Çalışmanın bu bölümünde Paver sisteminin teorik esasları ile titreşim verilerinin değerlendirilmesinin matematik altyapısı açıklanmıştır.

### 2.1 ASTM D6433 standardı (Paver sistemi)

Paver sistemi, rastgele dağılım prensiplerine göre seçilen  $225 \pm 90$  m<sup>2</sup> büyüklüğünde örnek alanlarda, ASTM D 6433 kodlu bozulma tanımlama kılavuzuna göre toplanan bozulma verilerinin değerlendirilerek, üstyapının mevcut performansını ortaya koyan bir değerlendirme metodudur. Değerlendirme düşük (D), orta (O) ve yüksek (Y) şiddet düzeylerinde toplanan verilerin, örnek birim'in (ÖB) (sample unit) büyüklüğüne oranlanarak elde edilen değer bozulma türüne göre hazırlanmış DD tablolarından sonuç değerleri okunarak yapılır. Elde edilen DD'ler 100'den çıkarılarak üstyapının performansını 0 – 100 arasında bir değerle tanımlayan PCI değeri elde edilir. Bir üstyapı için hesaplanan PCI değeri olarak 100 hiç bozukluk bulunmayan en iyi derecedeki üstyapıyı 0 ise tamamen bozulmuş kullanılmayacak derecedeki üstyapıyı ifade etmektedir. PCI, üstyapıya ait bozulma türü, bozulma miktarı ve bozulma şiddeti bileşenlerinin ortak değerlendirilmesi sonucunda üstyapının mevcut performansını gösteren bir indekstir [3, 17]. PCI indeksinin bileşenleri ve değerlendirme ölçeği Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. PCI bileşenleri ve değerlendirme ölçeği [17]

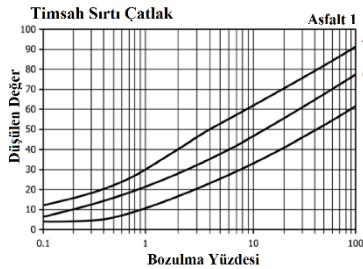
Üstyapıların mevcut performansını tanımlamak amacıyla kullanılan ölçek kavramı Paver sisteminde mevcut durumu farklı renklerle betimlemeye de kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu değerlendirme ölçeğinde üstyapı performansını "iyi", "yeterli" gibi sözel ifadelerle de tanımlamak mümkündür. Paver sisteminin altlık olarak kullandığı BSK kaplamalı yol ve otoparklar için kullanılan ASTM D 6433 kodlu standartta tanımlanan bozulma türleri, arazi ölçüm birimi, şiddeti ve oluşma nedenleri Tablo 1'de görülmektedir.



Bozulmaların değerlendirmesinde D, O ve Y şiddet düzeylerinde toplanan verilerin, ÖB'in büyüklüğüne oranlanarak ve 100 katı kadar çoğaltılarak bozulmanın örnek alan içindeki ağırlığı hesaplanmaktadır. Bulunan bu ağırlık değerleri ve bozulma şiddet düzeyi bilgisi yardımıyla elde edilen değerlerin bozulma türüne göre hazırlanmış grafiklerden DD değerleri okunarak incelenen bozulmanın ÖB içerisinde toplam bozulmaya katkısı belirlenmektedir. Sistemin kullandığı bu DD yaklaşımı herhangi bir türdeki ve şiddet düzeyindeki bozulmanın sayısal karşılığını ifade etmektedir. Böylece farklı türde, farklı ölçüm miktarında ve farklı şiddet düzeyinde toplanan üstyapı bozulma verilerinin, birbirleri ile karşılaştırılabilir bir sayısal ortak payda da ifade edilebilmesi sağlanmaktadır. Böylece çok çeşitli bozulma türleri bir ortak birim çatısında birleştirilerek normalize edilmiş halleriyle yorumlamaya imkan tanınmaktadır. Örnek olması açısından standartta timsah sırt çatlaklar türü bozulmalar için önerilen DD grafiği Şekil 2'de görülmektedir.

**Tablo 1.** Paver sistemi bozulma türleri [17]

Kod	Bozulma	Ölçüm Birimi	Şiddet Düzeyi	Bozulma Nedeni
1	Timsah Sırtı Çatlak	m <sup>2</sup>	Evet	Yük
2	Kusma	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
3	Blok Çatlak	m <sup>2</sup>	Evet	İklim
4	Kabarma ve Oturma	m	Evet	Diğer
5	Ondülasyon	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
6	Çökme	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
7	Kenar Çatlağı	m	Evet	Yük
8	Yansıma Çatlağı	m	Evet	İklim
9	Kenar/Banket Düşük.	m	Evet	Diğer
10	Boyuna ve Enine Çat.	m	Evet	Yük
11	Yama	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
12	Cilalanma	m <sup>2</sup>	Hayır	Diğer
13	Oyulma	sayı	Evet	Yük
14	Demiryolu Geçişi	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
15	Tekerlek izi	m <sup>2</sup>	Evet	Yük
16	Toplanma	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
17	Tabaka Kayması Çat.	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
18	Şişme	m <sup>2</sup>	Evet	Diğer
19	Soyulma ve Sökülme	m <sup>2</sup>	Evet	İklim
20	Ayrışma	m <sup>2</sup>	Evet	İklim

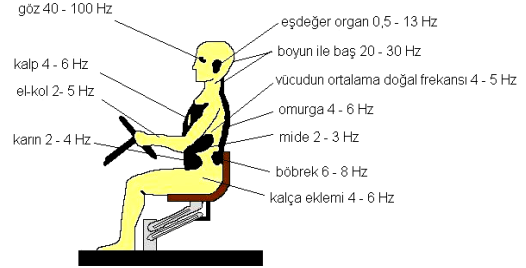


**Şekil 2.** DD grafiği örneği [17]

## 2.2 ISO 2631-1 standardı (Tüm vücut titreşimi)

Tüm vücut titreşiminin açıklanmasında insan vücudunun maruz kaldığı kabul edilebilir seviyeyi belirlemek için etkili olan başlıca faktörler ISO 2631-1 [18] standardında açıklanmaktadır. ISO 2631-1 standardında titreşimin insan üzerinde sağlık, konfor, algı kaybı (dikkat dağınıklığı vb.) ve hareket hastalıkları olmak üzere dört olası etkisinin bulunduğu vurgulanmaktadır. Uzun yıllar yapılan çalışmalar sonucu sağlık, konfor ve algı kaybının 0,5 Hz ile 80 Hz

arasındaki titreşim frekanslarında olduğu standartlaştırılmıştır. Öte yandan, doğadaki tüm nesnelere gibi insan vücudundaki organların da doğal frekanslı titreşimleri bulunmaktadır. Bu nedenle, vücudun maruz kaldığı titreşim ile organların titreşimlerinin birbiriyle çakışması durumunda ortaya çıkan rezonans uzun süreli maruziyet seviyelerinde vücutta rahatsızlıklara sebep olmaktadır [19]. İnsan vücut parçalarının kabul edilen doğal frekans değerleri Şekil 3'de görülmektedir.



**Şekil 3.** İnsan vücudunun doğal frekansları [20]

ISO 2631-1 standardında, ivme verilerinin 1/3 oktav bant frekans limitlerine göre Butterworth filtreleme tekniği kullanılarak sinyallerin analiz edilmesi tavsiye edilmektedir. Bu kapsamda, titreşim sinyalleri alçak geçiren ve yüksek geçiren filtreler kullanılarak ilgili bant frekanslarına dönüştürülerek ve dijital filtreleme yapılarak değerlendirilmektedir. ISO 2631-1 kodlu standartta belirtilen tanımlamalara uyarak tüm vücut titreşimini (TVT) kantitatif olarak değerlendirebilmek için, bir ivmeölçerin yolcu ile olan etkileşimini sağlamak amacıyla sürücünün tam altına (ischial tuberosity) bir kauçuk muhafaza diski içerisinde yerleştirilmiş olması gerekmektedir [18, 21].

Ölçümler sonucunda 1/3 oktav bantlarına ayrılan ivme değerlerine, frekans ağırlık filtrelerinde tanımlanan kazançların uygulanarak, ilgili eksen doğrultusunda ağırlıklandırılmış toplam değerleri ( $a_w$ ) aşağıdaki bağıntılar yardımıyla elde edilebilmektedir. ISO 2631-1 standardında insan vücuduna aktarılan ivmelenmeyi en yalın haliyle ifade etmek için kullanılacak en uygun parametrenin  $a_w$  olduğu ifade edilmektedir. Parametrenin sayısal ifadesi Denklem (1)'de gösterilmektedir.

$$a_w = \left[ \sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Burada  $a_w$  frekans ağırlıklandırılmış ivmeyi,  $w_i$  ilgili frekans tanımlanan ağırlık faktörünü,  $a_i$  i inci 1/3 oktav bandı için ivmelenme karesel ortalama kökü değerini göstermektedir.

Öte yandan, titreşim değerlendirmesinde titreşimin TVT üzerinde ortalama değerini ifade eden  $a_w$  parametresinin yanında anlık şok değerlerini de gösterme konusunda kabiliyeti olan maksimum aktarılan titreşim değeri (MTVV) parametresi de kullanılmaktadır. Bir değerlendirme zaman aralığında kaydedilen tüm ivme değerlerini belirli kısa zaman aralıklarında değerlendirmesi münasebetiyle yol

kullanıcılarına aktarılan rastgele şok titreşimlerini tanımlanabilmektedir. Yapılan değerlendirme, belirlenen bir zaman aralığında oluşan ağırlıklandırılmış hareketli karesel ortalamanın ( $a_w(t_0)$ ) maksimumu bulunarak MTVV parametresi üretilir. Söz konusu hareketli karesel ortalama değeri **Denklem (2)** ile ifade edilmektedir.

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Denklemden  $a_w(t)$  anlık frekans ağırlıklandırılmış ivmelenme değerini,  $\tau$  hareketli ortalama zaman dilimini,  $t$  ölçüm değişkenini,  $t_0$  ölçüm zamanını ifade etmektedir [18]. ISO 2631-1 standardında hareketli ortalamanın zaman dilimi olarak 1 saniye seçilmesi tavsiye edilmektedir. Bu bilgiler ışığında MTVV parametresi **Denklem (3)**'de ifade edildiği şekilde elde edilmektedir.

$$\text{MTVV} = \text{maks}[a_w(t_0)] \quad (3)$$

### 2.3 Yol ağı ve bozulmaların değerlendirilmesi

Çalışmada, Samsun iline ait farklı hizmet seviyelerindeki 20 adet farklı şehir içi karayolunda 98 adet farklı kesimde, diğer bir deyişle yaklaşık olarak 55.750 m uzunluğundaki yolda 337.867 m<sup>2</sup> alanda Paver sisteminin öngördüğü ASTM D 6433 kodlu standart esasına uygun yüzey bozulma verileri toplanmıştır. Aynı zamanda, Paver sistemine göre üstyapıların mevcut performanslarını gösteren PCI değerleri belirlenmiştir. Seçilen bu yollarda yüzey bozulma değerlendirmesi yapılması amacıyla Paver sistemi kurallarına uyan 1415 adet ÖB öngörülmüş olup 1375 adet ÖB'de yüzey bozulma verileri toplanmıştır. Bu anlamda, öngörülen ÖB'lerin % 97,2'sinde yüzey bozulma verileri toplanmakla birlikte, incelenen tüm kesimlerde Paver sistemi tanımına göre proje düzeyi hassasiyetini sağlayacak sayıda ÖB'de yüzey bozulma değerlendirmeleri yapılmıştır. Yüzey bozulma değerlendirmelerinin yapıldığı yol ağı **Şekil 4**'de görülmektedir.



**Şekil 4.** Bozulma değerlendirmelerinin yapıldığı yol ağı (mavi çizgi)

Toplanan yüzey bozulma verileri ASTM D 6433 kodlu standardın teorik temelleri üzerine hazırlanmış olan Paver Paket Yazılımı aracılığıyla değerlendirilmiştir. Bunun yanında kesimlerin PCI değerlerinin PCI ölçeğine göre renklendirilmiş yol ağı durumu **Şekil 5**'de görülmektedir.



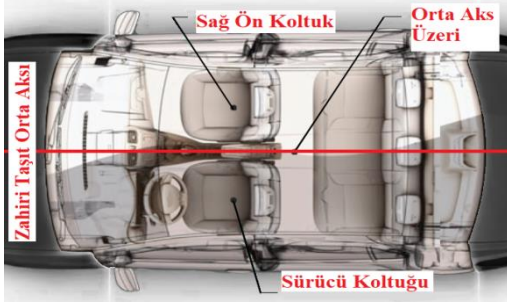
**Şekil 5.** Ağın PCI ölçeği değerlendirilmesi

### 2.4 Titreşim değerlendirmesi

Düşey eksen doğrultusunda oluşan titreşimlerin ana sebeplerinin taşıtın mekanik yapısından kaynaklı rotasyonel titreşimler ve taşıtın seyahat ettiği yolda görülen yüzey bozulmaları olduğu çok sayıda çalışmada vurgulanmaktadır [16, 22]. Bu bölümde kesimlerde görülen üstyapı bozulmalarının seyahat sırasında taşıta olan düşey doğrultudaki etkileri araştırılmıştır. Üstyapılarda görülen bozulmaların etkilerinin değerlendirilebilmesi için taşıt içerisinde üç farklı noktada seyahat halindeki düşey titreşimleri ölçülmüştür. Çalışmada amaç üstyapı bozulmalarından kaynaklı titreşim, başka bir deyişle konforsuzluğu araştırmak olduğu için yalnızca düşey doğrultudaki titreşimler değerlendirilmeye alınmıştır. Titreşim ölçümleri, Euro Car segment değerlendirmesine göre 4100-4600 mm uzunluk aralığında alt orta sınıf C segmentine giren bir araçla yapılmıştır.

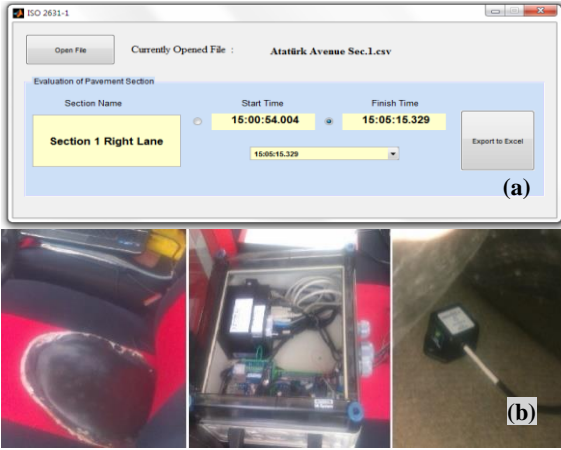
Titreşim değerleri üç adet ivmeölçer, GPS anteni ve veri toplama cihazından oluşan ivme ölçüm seti aracılığıyla toplanmıştır. Düşey titreşim verileri saniyede 1000 adet (1000 Hz) ve GPS verileri saniyede 1 adet aralıklarla toplanmış ve anlık olarak bilgisayara aktarılmıştır. Ölçümler sırasında ivmeölçerler, sürücü koltuğu (üzerinde sürücü var), sağ ön koltuk (üzerinde yolcu yok) ve orta aks üzeri (ayak hizası) olmak üzere üç farklı noktaya yerleştirilmiştir. Söz konusu ivme ölçümlerinin ISO 2631-1 kodlu standartta belirtilen tanımlamalara uyararak, yolcu ile olan etkileşimini değerlendirmek amacıyla bir ivmeölçer sürücünün tam altına yerleştirilmiş, diğerleri ilgili noktalara sabitlenmiştir. İvme ölçüm noktaları **Şekil 6**'da görülmektedir.

Bahsedilen titreşim ölçümlerinin kullanım amacı titreşim değerleri ile yüzey bozulmalar arasındaki ilişkileri ortaya koymak olduğu için ölçümlerden yolun boyuna profilinin değerlendirilmesi gerektiği sonucu çıkarılabilmektedir. Bu sebeple, titreşim ölçümlerinde genel prensip olarak ASTM E 950, E 1082 – 90, E 1926 – 08 vb. kodlu standartlarda tariflenen boyuna profil ölçüm prensipleri kabul edilmiştir. Söz konusu standartların genel yaklaşımı göz önüne alındığında ölçümlerin sabit bir şeritte, minimum 20 km/sa olmak üzere sabit bir hızda yapılması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Taşıt içerisine ölçüm noktaları

Ölçülen titreşim değerleri çalışmayı yapan araştırmacılar tarafından MATLAB® ara yüzünde geliştirilen ve ISO 2631 standardında açıklanan analiz yöntemini kullanan yazılım yardımıyla değerlendirilmiştir. Saha araştırmaları için kullanılan titreşim ölçüm seti ve titreşim verilerinin değerlendirilmesi için geliştirilen yazılım Şekil 7'de görülmektedir.



Şekil 7. (a) titreşim değerlendirme yazılımı, (b) titreşim ölçüm seti

Ölçümlerin sağlıklı ve verimli bir şekilde tamamlanabilmesi ve yorumlanması için hangi sürüş hızda yapılması gerektiği araştırılmıştır. Bu amaçla, seçilen pilot ölçüm bölgesinde düşey ivme ölçümleri 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda her şerit için ayrı ayrı yapılmıştır. Ayrıca, arazi çalışmaları sırasında 50 km/sa üzerinde hızlarda ölçüm yapabilmenin mümkün olmayacağı saptanmıştır. Pilot olarak seçilen değerlendirme yolunda ölçüm hızını değiştirmeden ölçümlerin yapılabilmesi için aynı platform ve şerit boyunca taşıtla durmadan devam edilerek ve hız mümkün olduğunca korunmaya çalışılarak ölçümler tamamlanmıştır.

Titreşim ölçümleri tanımlanan yol boyunca bütün halinde ve her bir trafik şeridi için ayrı ayrı ölçülmüştür. Sonrasında genellikle hemzemin kavşak noktaları kesim başlangıç ve sonu kabul edilerek yapılan ölçümler her bir kesim için parçalara ayrılmıştır. Bu anlamda, öncelikli olarak toplanan GPS ölçümleri coğrafi bilgi sistemi programında okunur hale getirilerek kesimlerin başlangıç ve sonunu gösteren noktalardaki zaman verileri okunarak, değerlendirme kesimleri birbirlerinden ayrılmıştır. Söz konusu çalışmanın

yapıldığı coğrafi bilgi sistemi uygulaması aşağıdaki Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Titreşim ölçümlerinin kesimlere ayrılması

Ölçümler sırasında kesim boyunca sabit hızın korunması esası gereğince, aracın ölçüm hızına ulaşması için kesimin başlangıcından yeter mesafe kadar önce ölçüme başlanıp, kesimin bitişinden itibaren durma mesafesi kadar sonra ölçüm sonlandırılmıştır. Bu anlamda, gerek birbirini takip eden kesimlerin ivme verilerinin ayrılmasında gerekse, hızlanma ve yavaşlama evrelerinde yapılan ölçümlerin kesimi gösteren ölçümlerden ayrılmasında yukarıda bahsedilen yazılımlar kullanılmıştır.

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Ölçüm hızının tespiti

Titreşim verilerinin değerlendirilmesi konusunda esas kabul edilen ISO 2631-1 kodlu standarda göre herhangi bir kesimin düşey doğrultuda titreşim karakteristiğini  $a_w$  titreşim parametresinin yansıttığı ayrıca, standartta kabul edilen ölçüm noktası tarifine uyan, TVT kavramına göre konforsuzluğu en doğru tarifleyen noktanın sürücü koltuğundan yapılan ölçüm olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, en uygun ölçüm hızının belirlenmesi araştırmasında sürücü koltuğundan ölçülen titreşim verilerinden elde edilen  $a_w$  değerlerinin kullanılması en doğru seçim olarak kabul edilmiştir.

En uygun ölçüm hızını belirlemek amacıyla seçilen pilot değerlendirme yolunda Paver sistemini kesimlere ayırma prensibine uyularak saptanan 16 adet yol kesiminin her bir şeridinde, aynı güzergahlarda 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda yapılan düşey titreşim ölçümlerinin parametreleri ISO 2631-1'e göre hesaplanmış  $a_w$  değerleri bulunmuştur.

Öte yandan, yapılan değerlendirmenin geliştirilmesi için araçtan kaynaklı oluşan düşey titreşimlerin etkisinden kurtulmak amacıyla her bir ölçüm noktası için kalibrasyon parametreleri üretilmiştir. Söz konusu parametrelerin üretilmesinde temel amaç taşıtın mekanik yapısından kaynaklı oluştuğu varsayılan ve her durumda oluşması beklenen düşey titreşim değerlerinin belirlenmesidir. Böylece, herhangi bir yolda yapılan ölçüm sonrasında bulunan parametrik titreşim değerlerinden kalibrasyon için bulunan parametrik titreşim değerlerinin çıkarılması ile düzeltilmiş titreşim parametresinin bulunacağı kabul edilmiştir. Söz konusu değerlendirmenin  $a_w$  parametresi için matematik ifadesi Denklem (4)'de görülmektedir. Çalışmada, kesimlere ait düşey titreşim verilerinin



belirlenmesinde, titreşim ölçümleri yapılarak her bir kesime ait hesaplanan titreşim parametrelerinden her bir hız için üretilen kalibrasyon parametrelerinin çıkartılması sonucu bulunan düzeltilmiş titreşim parametrelerinin (düz.a<sub>w</sub>) kullanılması ve buna göre değerlendirmelerin yapılması kabul edilmiştir.

$$\text{düz.a}_w = a_{w \text{ ham}} - a_w \text{ kalibrasyon} \quad (4)$$

En uygun ölçüm hızını belirlemek amacıyla düşey titreşim parametresi ile deneme kesimlerinin üstyapı performansı arasındaki yakınlık araştırılmıştır. İlişkilerin araştırılmasında öncelikli olarak doğrusal korelasyonlara bakılmıştır. Ardından korelasyondan başka daha birçok değerlendirme yapılmakla birlikte dikkate değer bir başka ilişkinin logaritmik ilişki ile kurulabildiği tespit edilmiştir. Gerek doğrusal ilişkili korelasyon, gerekse logaritmik ilişkideki regresyon değerlendirilmesinde en yüksek benzerlik 40 km/sa ölçüm hızında yakalandığı görülmüştür. Titreşim parametresi ile PCI arasındaki doğrusal korelasyon ve logaritmik ilişkideki regresyon değerleri Tablo 2’de görülmektedir.

**Tablo 2.** düz.a<sub>w</sub> – PCI arasındaki benzerlik

Ölçüm Hızı	20 km/sa	30 km/sa	40 km/sa	50 km/sa
Korelasyon	-0.909	-0.931	-0.966	-0.913
Logaritmik R <sup>2</sup>	0.832	0.874	0.917	0.799

Ölçüm değerlendirmelerinin yapıldığı ve çalışmanın ilerisi için kararların alınması gerektiği tam bu noktada, standardın en uygun ölçüm yeri olarak tanımladığı üzerinde sürücü varken sürücü koltuğu üzerinden yapılan titreşim ölçümlerinde sürücünün ağırlığının değerlendirme sonuçlarını etkileyip etkilemediği sorgulanmıştır. Bu amaçla, yüzey düzgünlük karakteristiğinin homojen olduğu kabul edilebilecek bir üstyapı kesiminde farklı ağırlıklı sürücülerle de ölçümler yapılmıştır. Diğer bir deyişle, yalnızca sürücü ağırlıklarının titreşim parametreleri üzerine olan etkilerini değerlendirebilmek amacıyla üstyapı PCI değeri 100 kabul edilebilecek durumda olan bir üstyapı kesiminde 58 kg, 80 kg ve 113 kg ağırlığındaki sürücülerle 20, 30, 40 ve 50 km/sa ölçüm hızlarında aynı güzergahta çok sayıda ölçümler yapılmış ve titreşim parametreleri hesaplanmıştır.

Elde edilen bu titreşim parametreleri hem parametrik hem de parametrik olmayan istatistik yöntemlerle değerlendirilmiş, değerler arasında istatistik olarak anlamlı bir fark olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan tüm istatistik değerlendirmelerde SPSS paket programı kullanılmıştır. Öncelikli olarak, parametrik olmayan yöntemlerle değerlendirme yapılmıştır. Bu anlamda, parametrik olmayan verilere sahip ikiden fazla grubun ölçümlerinin karşılaştırılmasında Kruskal-Wallis H Testi kullanılmıştır. 58, 80 ve 113 kg olmak üzere farklı sürücü ağırlıklarında ve 20, 30, 40 ve 50 km/sa hızlarda yapılan ölçümler sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön koltuk ölçüm noktalarının her biri için istatistik olarak değerlendirmiştir. Değerlendirme sonucunda, yalnızca 40 ve 50 km/sa hızlarda

yapılan ölçümlerde üretilen titreşim parametrelerinin farklarının istatistik olarak anlamsız olduğu saptanmıştır.

Bir değerlendirme de parametrik ANOVA testi kullanılarak yapılmıştır. Bilindiği üzere istatistik değerlendirmelerde parametrik değerlendirmelerin yapılabilmesi için verilerin homojen olması ve normal dağılıma uyması şartları aranmaktadır. Bu nedenle, öncelikli olarak varyans testi homojenliğine göre yapılan değerlendirme sonucu bulunan değerler 40 ve 50 km/sa hızlarda sürücü koltuğu ve orta aks üzerinde yapılan ölçümlerden üretilen titreşim parametrelerinin homojen olduğu görülmüştür. Ayrıca testin tamamlanmasında ikinci şart olarak kabul edilen normal dağılıma uygunluk da değerlendirilmiştir. Bu manada tüm titreşim parametrelerinde (a<sub>w</sub>, MTVV) Tek Örneklem Kolmogorov Smirnov Testi uygulanarak tüm sürüş hızlarında ve tüm ölçüm noktalarında 58, 80 ve 113 kg ağırlığındaki sürücüler için üretilen verilerin normal dağılıma uyduğu sonucuna ulaşılmıştır. Parametrik istatistik değerlendirme yöntemi olan ANOVA analizi sonucunda da tıpkı parametrik olmayan istatistik analiz Kruskal-Wallis H Testi değerlendirmesi sonucunda olduğu gibi yalnızca 40 ve 50 km/sa hızlarda yapılan ölçümlerde üretilen titreşim parametrelerinin farklarının istatistik olarak anlamsız olduğu saptanmıştır. İstatistik değerlendirmeler sonucu yalnızca 40 ve 50 km/sa hızlarda sürücü ağırlığının önemsiz olduğu kabul edilebilmektedir.

Yapılan tüm bu analizler sonucunda en uygun ölçüm hızı olarak titreşim parametresi ile PCI arasında benzerliğin en yüksek olduğu 40 km/sa sürüş hızı kabul edilmiştir. Üstyapının yuvarlanma yüzeyinden kaynaklı oluşan titreşimlerin değerlendirildiği çalışmalar detaylıca incelendiğinde en uygun sürüş ölçüm hızını belirlemek için bu bölümde anlatılan prosedüre benzer herhangi bir ön hazırlığın yapılmadığı dikkat çekmektedir. İlâveten literatürde sürüş esnasında taşıtın mekanik aksamlarının dönme etkisiyle oluşan titreşimi minimize edecek bir kalibrasyon düzeltmesinin yapılmadığı ise çok açıktır. Bu çalışmanın en özgün taraflarından bir tanesi olarak en uygun sürüş hızının belirlenmesi ve taşıt etkilerini minimize eden kalibrasyon sürecinin işletilmesi olduğu söylenebilmektedir.

### 3.2 Bozulma türleri ile titreşim parametreleri arasındaki benzerlikler

Çeşitli değerlendirmeler sonucunda en uygun ölçüm hızının 40 km/sa olması gerektiği ve 80 kg ağırlığındaki sürücü ile ölçümlerin yapılmasının bir farklılık arz etmeyeceğinin istatistik olarak tespitinden sonra Paver sistemine göre değerlendirilen 20 adet karayolunda yapılan düşey ivme ölçümleri ISO 2631-1 standardı esaslarına göre değerlendirilmiştir. 98 adet kesimin her birinin her ölçüm noktası için titreşim parametreleri hesaplanmıştır.

Daha önceden vurgulandığı üzere yapılan analizler sonucunda ölçüm hızı olarak 40 km/sa hızın en uygun hız olduğu belirlenmiştir. Fakat uygulamada, şehirçi trafik koşullarında, belirli bir şeritten tam olarak belirli bir hızda gitmenin trafik, yolların boyuna eğimi gibi geometrik kısıtlar vb. muhtelif sebeplerle sabit hızın korunmasının mümkün olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, ölçüm hızı 40±5 km/sa



olarak kabul edilmiştir. Ölçümler çok şeritli platformlarda her bir trafik şeridi için kesim başlangıç ve bitiş noktaları arasında ayrı ayrı ölçülmüş, titreşim parametreleri hesaplanmış, hesaplanan parametrelerin ortalaması alınarak kesimin titreşim parametre değerleri elde edilmiştir. Ölçümler sırasında, cihaz dahilinde bulunan konum belirleme anteni ile bir saniye aralıkla konum verilerinin yanında hız verileri de kaydedilmiştir. Dolayısıyla değerlendirmede, 1 sn aralıklarla toplanan araç hızının aritmetik ortalaması kesimin ortalama hızı olarak kabul edilmiş ve kesimlere ait km/sa biriminde hız bileşenleri elde edilmiştir. Yapılan bazı çalışmalardan hız bileşeninin düz.a<sub>w</sub> ile birlikte değerlendirmesinde en uygun ilişkinin logaritma e tabanında karşılığı alınarak düz.a<sub>w</sub> parametresine bölümü ile yakalanabildiği öngörülmüştür.

Çalışmanın veri toplama ve parametrik değerleri elde etme aşamasından sonra veriler arasındaki anlamlı ilişkiler araştırılmıştır. Bu maksatla öncelikli olarak yüzey bozulma verileri ile düzeltilmiş titreşim parametrelerinden geneli yansıtan düz.a<sub>w</sub> parametresi arasındaki benzerlikler araştırılmıştır. Öncelikli olarak, düz.a<sub>w</sub> parametresi ile hız faktörü değerlendirmeye katılarak ya da katılmaksızın PCI değerleri arasındaki doğrusal korelasyon değerleri incelenmiştir. Bulunan sonuçlar aşağıdaki Tablo 3’de görülmektedir.

**Tablo 3.** Titreşim parametresi – PCI korelasyon ilişkisi

	düz.a <sub>w</sub> - PCI	düz.a <sub>w</sub> / ln (Hız) - PCI
Sürücü Koltuğu	-0.9199	-0.9226
Orta Aks Üzeri	-0.9036	-0.9037
Sağ Ön Koltuk	-0.8305	-0.8334
Ortalamalar	-0.8955	-0.8978

Değerlendirme sonrasında, PCI değerleri ile düz.a<sub>w</sub> parametreleri arasında doğrusal ilişkinin negatif doğrultuda oldukça yüksek olduğu görülmüştür. En yüksek korelasyonun sürücü koltuğu üzerinde olduğu bunu sırasıyla orta aks üzeri ve sağ ön koltuğun izlediği saptanmıştır. Ayrıca, değerlendirmeye hız bileşeni dahil edildiğinde korelasyonun çok az miktarda arttığı belirlenmiştir. SPSS programında yapılan değerlendirmede %95 hassasiyet oranında korelasyonlar anlamlı çıkmıştır. Bir başka değerlendirme de Paver sisteminin kabul ettiği yük oluşma nedenlerine göre yapılmıştır. Bilindiği üzere Paver sistemi taşıt dingil yüklerinin tasarlanandan fazla olmasından kaynaklı bozulmaları ‘Yük’ türü, gece ve gündüz sıcaklık farkı ile yaz kış koşulları iklim etkilerine hazırlıklı olmayan malzeme seçiminden kaynaklı bozulmaları ‘İklim’ türü, imalat hataları, tasarım hataları, uygulama hataları, tuzlama çalışmaları vb. kaynaklı bozulmaları ‘Diğer’ türü bozulmalar olarak 3 ana alt başlıkta birleştirmiştir.

Paver sistemi hesap esaslarında her bir bozulmanın genel sonuca etkisi DD ile ortak paydada ifade edilmektedir. Başka bir deyişle sistemde DD kullanılarak, saha çalışmalarında farklı ölçüm birimlerinde (uzunluk, alan vb.), farklı boyutlarda, farklı şiddet düzeylerinde (D, O, Y) toplanan bozulmalar aynı birim ile sayısal olarak ifade edebilme imkanı sağlamaktadır. Böylece, Yük, İklim ve Diğer türü bozulma sınıflarına giren her bir bozulmanın DD değerleri

hesaplanarak titreşim parametreleri ile benzerliği araştırılmıştır. Sınırları tanımlanmış bir yol kesiminde titreşim her bir trafik şeridi için kesim boyunca ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Diğer bir deyişle titreşim parametreleri değerlendirilen kesimin bütününe yansıtılmaktadır. Oysaki bozulma verilerine bağlı olarak bulunan DD değerleri kesimin büyüklüğünden bağımsız yalnızca değerlendirilen bozulmanın olduğu bölgeyi yansıtılmaktadır. Bu nedenle, bozulmaların DD verileri bozulma miktarının ÖB alanına bölünmesiyle normalize edilmesinden dolayı titreşim parametreleri gibi kesimin bütününe ifade edebilmektedir. Bu bölme işlemi sonucunda bulunan değerlerin DD karşılıkları ile (bkz. örnek Şekil 2) titreşim parametreleri arasındaki Pearson doğrusal korelasyonları araştırılmıştır. Değerlendirmeler sonucunda analiz edilen korelasyon değerleri Sürücü Koltuğu (S.K.), Orta Aks Üzeri (O.A.Ü.) ve Sağ Ön Koltuk (S.Ö.K.) ölçüm noktalarında ve bu üç değer aritmetik ortalaması (Ort.) alınarak bulunan değerlerde yük türü bozulmalar için Tablo 4’de, iklim türü bozulmalar için Tablo 5’de ve diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalar için Tablo 6’da görülmektedir. Tablolarda %95 hassasiyet oranında korelasyonları anlamlı olan ilişkiler gri dolgulu hücrelerle gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Titreşim – Yük Türü Bozulmaların (T.B.) korelasyon ilişkisi

	a <sub>w</sub> - Yük T.B.	a <sub>w</sub> / ln (Hız) - Yük T.B.	MTVV - Yük T.B.	MTVV / ln (Hız) - Yük T.B.
S.K.	0.568	0.581	0.213	0.224
O.A.Ü	0.634	0.644	0.242	0.252
S.Ö.K	0.606	0.615	0.228	0.236
Ort.	0.627	0.638	0.245	0.255

**Tablo 5.** Titreşim – İklim Türü Bozulmaların (T.B.) korelasyon ilişkisi

	a <sub>w</sub> - İklim T.B.	a <sub>w</sub> / ln (Hız) - İklim T.B.	MTVV - İklim T.B.	MTVV / ln (Hız) - İklim T.B.
S.K.	0.201	0.211	-0.102	-0.097
O.A.Ü	0.266	0.274	-0.089	-0.084
S.Ö.K	0.364	0.372	-0.004	0.001
Ort.	0.317	0.326	-0.049	-0.044

**Tablo 6.** Titreşim – Diğer Türü Bozulmaların (T.B.) korelasyon ilişkisi

	a <sub>w</sub> - Diğer T.B.	a <sub>w</sub> / ln (Hız) - Diğer T.B.	MTVV - Diğer T.B.	MTVV / ln (Hız) - Diğer T.B.
S.K.	0.662	0.672	0.245	0.252
O.A.Ü	0.669	0.674	0.263	0.270
S.Ö.K	0.699	0.705	0.302	0.308
Ort.	0.706	0.714	0.300	0.307

Oluşma nedenlerine göre bozulmalar Tablo 1’de sınıflanmıştır. Analizlerden anlaşıldığı üzere yük türü bozulmalar ile diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalar a<sub>w</sub> ve MTVV titreşim parametrelerinde hız faktörünü dahil ederek ya da etmeksizin tüm titreşim ölçüm noktalarında korelasyonlar anlamlı çıkmıştır. İklim türü bozulmalarda ise yalnızca a<sub>w</sub> parametresi ile olan ilişkiler anlamlı çıkmıştır.

Genel olarak anlık şok değerlerini daha çok yansıttığı kabul edilen MTVV parametresinin korelasyon değerlerinin  $a_w$  parametresinin yanında çok daha zayıf kaldığı dikkat çekmektedir. Bu durum genel konforsuzluğu ifade eden  $a_w$  parametresinin MTVV parametresine nazaran yüzey bozulmaları ile ilişkileri ifade etmede çok daha etkili olduğunu akıllara getirmektedir. Standartta önerilen yaklaşıma göre MTVV parametresi  $a_w$  parametresinin ölçüm süresi boyunca 1 sn aralıklarla değerlendirilmesi ve değer olarak en büyüğünün alınması ile elde edilmektedir. Anlaşıldığı üzere 40 km/sa gibi sürüş hızı dikkate alındığında önemli miktarda titreşime sebep olan bozulmalardan dahi çok kısa süre etkilenildiği için kısa aralıklarla değerlendirme yaklaşımı böyle bir analizde sonuç üreten bir yaklaşım olmayacaktır. Ayrıca standardın tavsiyesine göre 1 sn'den daha kısa aralıkla veriler değerlendirildiğinde çok uç değerlerde sonuçlar alınacağından gerçekçi sonuçlar vermeyecektir. Bu nedenle çalışmanın ileriki aşamasında karşılaştırmalarda titreşim parametresi olarak  $a_w$  kullanılmıştır.

Değerlendirmeler sonucunda, genel olarak yüksek korelasyonun diğer sebeplerden ve yükten kaynaklı bozulmalarda olduğu iklimden kaynaklı bozulmaların korelasyonun ise daha az olduğu saptanmıştır. Bu durumun sebebi olarak, boyuna ve enine çatlak, blok çatlak, soyulma ve sökülme vb. iklimden kaynaklı bozulmaların yüzey düzgünlüğü üzerine dolayısıyla düşey titreşime etkilerinin az oluşu olduğu rahatlıkla söylenebilmektedir. Göreceli olarak yükten kaynaklı bozulmalarda orta aks üzerindeki ölçümlerde korelasyon daha yüksek iken diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalarda tüm ölçüm noktalarının korelasyonlarının birbirlerine yakın olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca diğer sebeplerden kaynaklanan bozulmaların korelasyonlarının yük sebebi bozulmalara nazaran az miktarda da olsa daha fazla olduğu görülmektedir. altyapı yetersizlikleri, imalat hataları gibi sebeplerle oluşan bozulmalar yük ve iklim gibi tasarım hataları sonucunda oluşan bozulmalara nazaran daha çok konforsuzluğa sebep olmaktadır. Örneğin çökme gibi üst yapıyı destekleyen tabakaların ve altyapının yetersiz sıkışmasından kaynaklanan bozulmaların, öte yandan düzgün tanzim edilemeyen yamaların konforsuzluk üzerindeki etkileri büyüktür. Genel itibarıyla farklı ölçüm noktalarındaki korelasyonlar arasındaki farkların küçük olduğu ve hız bileşeninin değerlendirmeye katılmasıyla da korelasyonlarda önemli farkların oluşmadığı açıkça görülmektedir.

Benzer bir değerlendirme de ayrı ayrı her bir bozulma türü için yapılmıştır. Tablo 1'de bozulmalar ASTM D 6433 standardına göre bozulma kodu altında numaralandırılmıştır. Analizlerde bozulmalar burada bahsi geçen kodlarla ifade edilmiştir. Değerlendirilen yol ağında 8 (yansıma çatlak) ve 9 (kenar/banket düşüklüğü) kodlu bozulmalar yer almadığı için analizlerde bu bozulmalara yer verilmemiştir. Değerlendirmeler sonucunda analiz edilen Pearson korelasyon değerleri her bir bozulma için Tablo 7'de görülmektedir. Tabloda %95 hassasiyet oranında korelasyonları anlamlı olan ilişkiler gri dolgulu hücrelerle gösterilmiştir.

**Tablo 7.** Titreşim – bozulmaların korelasyon ilişkisi

	$a_w - 1$	$a_w - 2$	$a_w - 3$	$a_w - 4$	$a_w - 5$
S.K.	0.524	0.017	0.098	0.141	0.406
O.A.Ü	0.569	-0.001	0.147	0.197	0.302
S.Ö.K	0.605	0.086	0.077	0.233	0.444
Ort.	0.600	0.050	0.104	0.213	0.410
	$a_w - 6$	$a_w - 7$	$a_w - 8$	$a_w - 9$	$a_w - 10$
S.K.	0.537	-0.029	-	-	0.165
O.A.Ü	0.550	-0.059	-	-	0.144
S.Ö.K	0.590	-0.091	-	-	0.045
Ort.	0.588	-0.074	-	-	0.098
	$a_w - 11$	$a_w - 12$	$a_w - 13$	$a_w - 14$	$a_w - 15$
S.K.	0.537	0.132	0.434	0.363	0.180
O.A.Ü	0.587	0.195	0.495	0.343	0.216
S.Ö.K	0.566	-0.007	0.511	0.396	0.068
Ort.	0.585	0.078	0.509	0.388	0.134
	$a_w - 16$	$a_w - 17$	$a_w - 18$	$a_w - 19$	$a_w - 20$
S.K.	0.068	0.191	0.315	-0.165	0.332
O.A.Ü	0.036	0.166	0.183	-0.136	0.388
S.Ö.K	-0.056	0.061	0.187	-0.159	0.535
Ort.	-0.008	0.118	0.216	-0.159	0.472

Korelasyon değerleri sayısal büyüklükler olarak incelendiğinde herhangi bir titreşim ölçüm noktasında herhangi bir bozulma türünde çok yüksek değerlerde korelasyon büyüklüklerinin oluşmadığı görülmektedir. Saha gözlemlerinde, bir üst yapı kesiminin yüzeyinde bir bozulma türünün kendi başına oluşmadığı, birbirini tetikleyen etkilerle aynı oluşma mekanizmasına bağlı olarak bozulmaların birbirlerine yakın sıklıklarda olduğu görülmektedir. Bu çalışmada her ne kadar bozulma türlerini DD normalleştirme yaklaşımı ile birbirlerinden ayırarak bozulma türlerinin konforsuzluğa etkileri açısından bir farklılık yaratılmak istense de değerlendirilen yol kesimlerinde bozulma türlerinin birbirlerini etkilemeleri tekil değerlendirmedeki analizlerin başarısını zayıflatmaktadır.

Yapılan analizlerde 1 (timsah sırtı çatlak), 5 (ondülasyon), 6 (çökme), 11 (yama), 13 (oyulma), 14 (demiryolu geçişi) ve 20 (ayırışma) kodlu bozulmalarda tüm ölçüm noktalarında bozulmaların titreşim parametreleri ile dolayısıyla konforsuzlukla korelasyonlu olduğu ve bu korelasyonun istatistik olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Titreşim parametresi ile korelasyonları anlamlı çıkan bu bozulma türleri oluşma nedenlerine göre değerlendirildiğinde her üç oluşma nedenine göre de bozulmaların titreşim parametresi üzerinde etkili olduğu görülmektedir. En yüksek korelasyon değerleri 1 (timsah sırtı çatlak), 5 (ondülasyon), 6 (çökme), 11 (yama) ve 13 (oyulma) kodlu bozulmalarda görülmektedir.

Analiz değerlerinden sürücü koltuğunda hissedilen en büyük konforsuzluk sebebinin eşit korelasyon değerleriyle 6 (çökme) ve 11 (yama) türü bozulmalardan kaynaklandığı görülmektedir. Çökme (6) türü bozulmalarda taban yetersizliğinden oluşan oturmalarla rögar kapağı gibi yer altı sistemlerinin de dayanım yetersizliklerinin de etkili olduğu söylenebilir. Bu durum özellikle yer altı sistemlerinin kurallarına uygun yapılması yol üst yapısını tasarımına uygun yapmak kadar önemli olduğunu düşündürmektedir.

Ayrıca esnek üstyapıların en avantajlı çözümlerinden olan yamalar (11) teknik kurallarına uygun yapılmazsa ciddi miktarda konforsuzluk sebebidir. Sadece yama ve çökme türü bozulmalar ülkemizde yerel yönetimlerin üstyapı ve altyapıların yönetilmesindeki bakış açılarında ışık tutmaktadır. Aracın orta alanda ayak seviyesinde (O.A.Ü.) en büyük konforsuzluk yine yama (11) türü bozulmalar ile en yüksek oranda ilişkili iken üzerinde sürücünün olmadığı boş koltukta ise (S.Ö.K.) en yüksek konforsuzluk timsah sırtı çatlaklarla (1) ilişkili olmaktadır. Bu üç ölçüm noktasındaki üretilen analiz değerlerinin ortalaması alındığında ise yine timsah sırtı çatlakların (1) konforsuzlukla yakın ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.

Literatürde yüzey bozulmalar ile konforsuzluk arasındaki ilişkiler ancak sürüş konforunu yansıttığı kabul edilen IRI parametresi kullanılarak yapılmıştır. Sınırlı sayıda yapılan çalışmalardan Mubarakı [23] çalışmasında boyuna ve enine çatlaklarda (10) 0.4, tekerlek izi türü bozulmalarda (15) 0.39 ve ayrışma türü bozulmalarda (2) ise 0.4 gibi benzerlikler bulunduğu görülmektedir. Bu çalışma ile ayrışma türü bozulmalarda benzerlikler birbirine yakın görülmektedir. Literatürde çalışmalar sıklıkla bozulma verilerini IRI değerini tahmin eden modellerde bağımsız değişken olarak kullandıkları için bu çalışmadaki analiz sonuçlarını karşılaştırabilecek bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Benzer şekilde bozulmaların değerlendirilmesinde genel itibarıyla farklı ölçüm noktalarındaki korelasyonlar arasındaki farkların küçük olduğu ve hız bileşeninin değerlendirmeye katılmasıyla da korelasyonlarda önemli farkların oluşmadığı açıklıkla görülmektedir. Ölçüm hızının da değerlendirilmeye katılması ile elde edilen korelasyon değerleri Tablo 8'de görülmektedir.

**Tablo 8.** Titreşim ve ölçüm hızı – bozulmaların korelasyon ilişkisi

	$a_w / \ln(Hız)-1$	$a_w / \ln(Hız)-2$	$a_w / \ln(Hız)-3$	$a_w / \ln(Hız)-4$	$a_w / \ln(Hız)-5$
S.K.	0.540	0.012	0.102	0.157	0.405
O.A.Ü	0.582	-0.007	0.150	0.212	0.298
S.Ö.K	0.615	0.082	0.080	0.245	0.442
Ort.	0.612	0.046	0.107	0.227	0.408
	$a_w / \ln(Hız)-6$	$a_w / \ln(Hız)-7$	$a_w / \ln(Hız)-8$	$a_w / \ln(Hız)-9$	$a_w / \ln(Hız)-10$
S.K.	0.535	-0.029	-	-	0.159
O.A.Ü	0.545	-0.059	-	-	0.137
S.Ö.K	0.589	-0.092	-	-	0.041
Ort.	0.586	-0.074	-	-	0.092
	$a_w / \ln(Hız)-11$	$a_w / \ln(Hız)-12$	$a_w / \ln(Hız)-13$	$a_w / \ln(Hız)-14$	$a_w / \ln(Hız)-15$
S.K.	0.549	0.147	0.436	0.362	0.186
O.A.Ü	0.596	0.209	0.494	0.341	0.221
S.Ö.K	0.574	0.004	0.513	0.396	0.073
Ort.	0.595	0.090	0.510	0.387	0.140
	$a_w / \ln(Hız)-16$	$a_w / \ln(Hız)-17$	$a_w / \ln(Hız)-18$	$a_w / \ln(Hız)-19$	$a_w / \ln(Hız)-20$
S.K.	0.061	0.185	0.318	-0.152	0.335
O.A.Ü	0.030	0.160	0.184	-0.123	0.388
S.Ö.K	-0.060	0.057	0.188	-0.149	0.537
Ort.	-0.013	0.113	0.217	-0.147	0.474

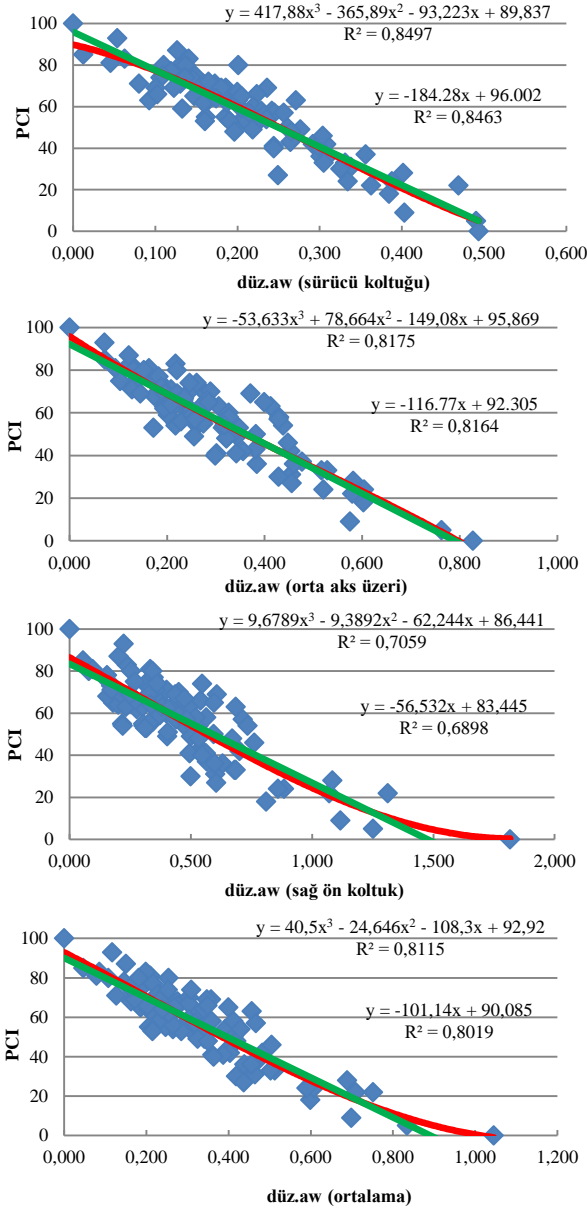
Bozulma türlerin göre yapılan korelasyon değerlendirmesinde MTVV parametresinin kesimin genelini yansıtmak konusunda yetersiz kaldığı öngörüsüyle her bir bozulma için korelasyon değerlendirmeleri MTVV parametresi için tekrarlanmamıştır.

Literatür detaylıca incelendiğinde yüzey bozulmalarının sürüş konforuna etkileri ya da benzerliklerini araştıran çalışmaların sınırlı olduğu göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın benzeri bozulmaları DD gibi bir parametre ile normalleştiren ve birbirine benzeten aynı zamanda doğrudan bir konfor parametresi ile karşılaştıran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Üstelik burada olduğu gibi esnek üstyapılar için ASTM D 6433 standardındaki çoğu bozulma türünü değerlendirmeye alan, bozulmaları oluşma nedenlerine göre gruplayan ve farklı noktalardaki titreşim değerleri ile karşılaştıran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmanın özgün tarafının bu noktalar olduğunun altının çizilmesi gerekmektedir.

### 3.3 Titreşim parametreleri ve PCI arasındaki matematiksel ilişkiler

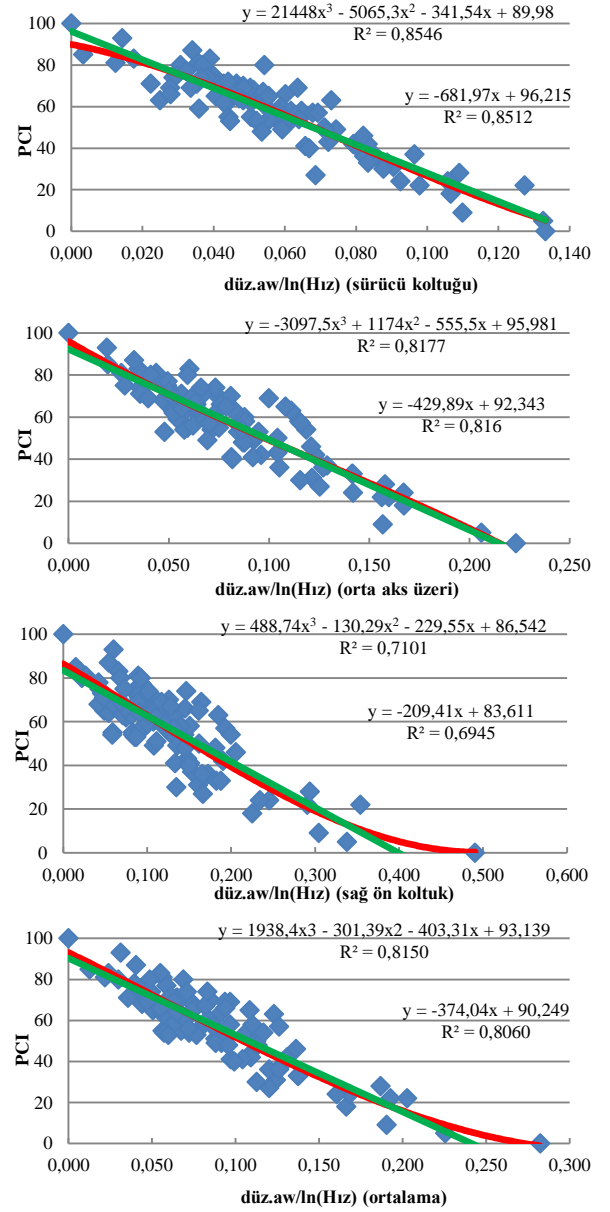
Doğrusal ilişkileri tanımlayan korelasyonlardan başka daha birçok değerlendirme yapılmakla birlikte dikkate değer bir başka ilişkinin 3. derece polinom ilişkisi olduğu tespit edilmiştir.

Değerlendirmeler sonucunda benzerliklerin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Öte yandan, benzerliklerin hız bileşeninin değerlendirmeye alındığı durumda, alınmadığı durumdan daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, en yüksek ilişkinin sürücü koltuğunda yapılan ölçümlerde olduğu görülmektedir. Sürücü koltuğunu sırasıyla orta aks üzeri ve üç noktada (sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön koltuk) yapılan ölçümlerin ortalamalarının alınarak oluşturulan toplam ortalamalar değerinin takip ettiği görülmektedir. En düşük ilişki sağ ön koltukta yapılan ölçümlerde görülmektedir. Sürücü koltuğu üzerinde oluşan  $d_{z,aw}$  parametresi ile PCI arasında 3. derece polinom ilişkisi  $R^2=0.8497$ , doğrusal ilişkisi  $R^2=0.8463$  regresyon değeri ile belirlenmiştir. Yapılan tüm değerlendirmelerde, ağırlıklı olarak sürücü koltuğu üzerinde oluşan titreşimlerden üretilen parametrelerle, yüzey bozulma çıktıları arasında yüksek bir ilişkinin olduğu göze çarpan bir gerçektir. Bu nedenle, titreşim parametrelerinden üstyapının durumunu tahmin eden modellerin oluşturulmasında sürücü koltuğu üzerinden kaydedilen titreşim verileri önemli bir rol oynamaktadır. Orta aks üzeri ve sağ ön koltukta yapılan değerlendirmelerde sırasıyla polinom regresyon değerleri  $R^2=0.8175$  ve  $R^2=0.7059$ , doğrusal regresyon değerleri  $R^2=0.8164$  ve  $R^2=0.6898$  olarak karşımıza çıkmaktadır. Oldukça yüksek olan bu regresyon katsayıları, orta aks üzeri ve sağ ön koltukta yapılan titreşim ölçümlerinin de PCI değeri ile yakından ilişkili olduğunu göstermektedir. Yapılan ölçümlerin ortalamalarında ise polinom regresyon  $R^2=0.8115$  doğrusal regresyon  $R^2=0.8019$  olarak karşımıza çıkmaktadır. Kurulan bu matematiksel ilişkiler grafik haliyle Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Ölçüm noktalarına göre  $a_w$  – PCI ilişkileri

Sonraki aşamada, değerlendirmeler hız bileşeni de eklenerek yapılmıştır. Hız bileşeninin katsayı olarak değerlendirmeye girmesiyle regresyon katsayılarının dolayısıyla ilişkilerin derecesinin arttığı gözlemlenmiştir. Hız bileşeni değerlendirmeye alındığında da en yüksek regresyon polinom regresyon  $R^2=0.8546$  doğrusal regresyon  $R^2=0.8512$  olarak sürücü koltuğunda, daha sonra polinom regresyon  $R^2=0.8177$  doğrusal regresyon  $R^2=0.8166$  ile orta aks üzeri, polinom regresyon  $R^2=0.8150$  doğrusal regresyon  $R^2=0,8060$  ile toplam ortalamalar ve son olarak polinom regresyon  $R^2=0.7101$  doğrusal regresyon  $R^2=0.6945$  ile sağ ön koltukta görülmektedir. Oluşturulan bu matematiksel ilişkiler grafik haliyle Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Ölçüm noktalarına göre  $a_w/\ln(\text{Hız})$  – PCI ilişkileri

#### 4 Sonuçlar

Çalışmada, BSK yol üstyapılarında oluşan yüzey bozulmaları ile taşıt içerisinde maruz kalınan titreşim değerleri arasındaki korelasyonlar araştırılmıştır. Bu amaçla, 98 adet yol kesimde yüzey bozulma verileri kayıt edilmiş, bozulmalar esasları ASTM D 6433 kodlu standartta tanımlanan Paver sistemine göre analiz edilmiştir. Bozulmaların üstyapıların mevcut performansları üzerine olumsuz etkileri düşülen değer (DD) yaklaşımı kullanılarak normalize edilmiştir. Standart bir yolcu taşıtı içerisinde sürücü koltuğu, orta aks üzeri ve sağ ön yolcu koltuğu olmak üzere üç farklı noktada düşey titreşim parametreleri belirlenmiştir. Her bir üstyapı kesimi için taşıt içerisinde üç farklı noktada üretilen titreşim parametreleri ile bozulmaları ifade eden DD verileri arasındaki benzerlik değerleri araştırılmıştır. Değerlendirmelerde her bir bozulma türü



dikkate alındığı gibi yük, iklim ve diğer sebepler olmak üzere üç farklı bozulma nedenine göre bozulma türleri gruplanarak da değerlendirilmeler tekrarlanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucun özet olarak aşağıdaki önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

- Genel konforsuzluğu ifade eden  $a_w$  parametresinin MTVV parametresine nazaran yüzey bozulmaları ile ilişkileri ifade etmede çok daha etkili olduğu saptanmıştır.
- Genel olarak yüksek korelasyonun yük ve diğer sebepler kaynaklı bozulmalarda olduğu iklimden kaynaklı bozulmaların korelasyonun ise daha az olduğu tespit edilmiştir.
- Göreceli olarak yükten kaynaklı bozulmalarda orta aks üzerindeki ölçümlerde korelasyon daha yüksek iken diğer sebeplerden kaynaklı bozulmalarda tüm ölçüm noktalarının korelasyonlarının birbirlerine yakın olduğu görülmüştür.
- Yapılan analizlerde 1 (Timsah Sırtı Çatlak), 5 (Ondülasyon), 6 (Çökme), 11 (Yama), 13 (Oyulma), 14 (Demiryolu Geçışı) ve 20 (Ayrışma) kodlu bozulmalarda tüm ölçüm noktalarında bozulmaların titreşim parametreleri ile dolayısıyla konforsuzlukla korelasyonlu olduğu ve bu korelasyonun istatistik olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir.
- 1 (timsah sırtı çatlak), 5 (ondülasyon), 6 (çökme), 11 (yama) ve 13 (oyulma) kodlu bozulmaların titreşim parametreleri ile korelasyonunun diğer bozulma türlerine göre bir miktar daha fazla olduğu açıkça görülmektedir.

Yapılan bu çalışma ile bakım ve onarımdan sorumlu otoritelere sorumluluk ağlarındaki yollarda sürüş konforunu daha yüksek tutabilmek adına onarım önceliklerinin belirlenmesi noktasında faydalı çıktılarının üretildiği düşünülmektedir. Çalışmanın ileriki aşamalarında daha büyük veri yığınları ile çalışılmanın tekrarlanmasının ve aynı zamanda diğer üstyapı çeşitleri için de benzer analizlerin yapılmasının literatüre yapılan katkıyı ziyadesiyle pekiştireceği düşünülmektedir.

#### Teşekkür

Yazarlar çalışmaya verdiği katkılardan dolayı Ondokuz Mayıs Üniversitesi ve İstanbul Gelişim Üniversitesine teşekkür ederler.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %13

#### Kaynaklar





- [1] R. Haas, W. R. Hudson, and J. P. Zaniewski, Modern Pavement Management. Malabar, Florida, USA: Krieger Pub. Co., p. 583, 1994.
- [2] M. J. Griffin, Handbook of human vibration. London, UK: Academic press, p. 1008, 2012.
- [3] M. Y. Shahin, Pavement management for airports, roads, and parking lots. New York: Springer, p. 572, 2005.
- [4] U. Kırbaş and M. Kardeşahin, Performance models for hot mix asphalt pavements in urban roads. Construction and Building Materials, 116, 281-288, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.118>.
- [5] A. Wolters, K. Zimmerman, K. Schattler, and A. Rietgraf, Implementing pavement management systems for local agencies. 2011.
- [6] L. Picado-Santos, A. Ferreira, A. Antunes, C. Carvalheira, B. Santos, M. Bicho, I. Quadrado, S. Silvestre, Pavement management system for Lisbon. vol. 157: Thomas Telford Ltd, pp. 157-165, 2004.
- [7] A. Ferreira, L. d. Picado-Santos, Z. Wu, and G. Flintsch, Selection of pavement performance models for use in the Portuguese PMS. International Journal of Pavement Engineering, 12, 1, 87-97, 2011. <https://doi.org/10.1080/10298436.2010.506538>.
- [8] M. W. Sayers, T. D. Gillespie, and C. A. V. Queiroz, The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements. Washington, D.C., U.S.A.: The World Bank, p. 454, 1986.
- [9] M. W. Sayers and S. M. Karamihas, Interpretation of road roughness profile data. Federal Highway Administration, Final Report UMTRI 96-19, 1996.
- [10] M. Kardeşahin and S. Terzi, Performance model for asphalt concrete pavement based on the fuzzy logic approach. Transport, 29, 1, 18-27, 2014. <https://doi.org/10.3846/16484142.2014.893926>.
- [11] S. Terzi, Modeling the pavement serviceability ratio of flexible highway pavements by artificial neural networks. Construction and Building Materials, 21, 3, 590-593, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.11.001>.
- [12] S. Terzi, Modeling for pavement roughness using the ANFIS approach. Advances in Engineering Software, 57, 2013, 59-64, 2013, doi: 10.1016/j.advensoft.2012.11.013.
- [13] U. Kırbaş, IRI Sensitivity to the Influence of Surface Distress on Flexible Pavements. Coatings, 8, 8, 2018. <https://doi.org/10.3390/coatings8080271>.
- [14] U. Kırbaş, M. Kardeşahin, B. Demir, M. Komut, and E. N. Ünal, Bitümlü Sıcak Karışım Üstyapılarda Görülen Yüzey Bozulmaları ile Düzgünsüzlük Arasındaki İlişkilerin Modellenmesinde Bazı Yaklaşımlar. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22, 2, 2018. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.32804>.
- [15] F. Wang and S. Easa, Analytical Evaluation of Ride Comfort on Asphalt Concrete Pavements. Journal of Testing and Evaluation, 44, 4, 1671-1682, 2016. <https://doi.org/10.1520/jte20140339>.
- [16] P. Múčka, Vibration Dose Value in Passenger Car and Road Roughness. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 146, 4, 04020064 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000200>.
- [17] ASTM D 6433-16, Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM, West Conshohocken, PA, United States, 2016.

- [18] ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General Requirement, ISO, Geneva, Switzerland, 1997.
- [19] C. İ. Çay, Tarım Traktörleri Sürücü Koltukları Titreşim Sönümleme Elemanları Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara, 2006.
- [20] İ. Keleş, Titreşim Esaslı Taşıt Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Antakya, 2001.
- [21] ISO BS EN 8041, Human response to vibration - Measuring instrumentation, ISO, Geneva, Switzerland, 2005.
- [22] U. Kırbaş and M. Kardeşahin, Pavement performance levels causing human health risks. Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, 70, 10, 851-861, 2018, <https://doi.org/10.14256/jce.2120.2017>.
- [23] M. Mubarakı, Study the Relationship between Pavement Surface Distress and Roughness Data. 5<sup>th</sup> International Conference on Transportation and Traffic Engineering (ICTTE 2016), MATEC Web of Conferences 81, 02012, 2016, <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168102012>





## Kubbe yapı formlarının kenet ile güçlendirilmesi Strengthening of dome type structures with clamps

Fatih Kürşat Fırat<sup>1</sup> , Şükran Tanrıverdi<sup>2,\*</sup> , Ali Ural<sup>3</sup> , Mehmet Emin KARA<sup>4</sup> 

<sup>1,2,3,4</sup> Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray Türkiye

### Öz

Tarihi yapılar buldukları dönemin kültürünü, tarihini, ekonomik ve sosyal özelliklerini, inançlarını, yansıtan yapı türleridir. Bu yapı türleri arasında yer alan kubbeli yapılar, geniş açıklıkları geçmek amacıyla yapılmış eğrisel örtü sistemleridir. Tarihi yapıları gelecek nesillere de aktarabilmek için yapıların korunması ve yapısal davranışlarının iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, hasar görmüş kubbe yapı formlarının, kenet ile güçlendirme tekniğini incelemek için deneysel çalışma yapılmıştır. İlk olarak 2 m çapında 1 m yüksekliğinde sekizgen kasnaklı kubbenin düşey yük altındaki davranışı incelenmiştir. Kubbe yük taşıma kapasitesine ulaştığı zaman kubbe üzerinde bazı çatlaklar meydana gelmiştir. Bu hasarlar kenet bağlantı elemanı kullanılarak giderilmiştir. Kenet ile güçlendirilen kubbede, düşey yük altında deneysel olarak incelenmiştir. Referans kubbe ve kenet ile güçlendirilmiş kubbenin deney sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çalışma sonucunda günümüzde kubbe yapı formlarının onarım ve güçlendirilmesinde çok sık kullanılan kenet uygulamalı güçlendirme yönteminin kubbenin taşıma kapasitesini artırmadığı belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Tarihi yapılar, Yığma kubbe, Güçlendirme, Kenet uygulama

### 1 Giriş

Kubbeler, kemerli yapıların merkezinden geçen dik eksen etrafında döndürülmesiyle elde edilen yapı türleridir. Kubbe formunun ilk örnekleri Mezopotamya'da görülmekle birlikte kubbe, ilk Hristiyan, Ermeni, Sasani, Bizans, Roma ve İslam mimarilerinde de yapısal eleman olarak kullanılmıştır. Gerek ülkemizde gerekse diğer ülkelerde birçok kubbeli yapılar bulunmaktadır. Kültürel miraslarımız arasında bulunan kubbeli yapıların, onarılması, güçlendirilmesi ve korunması hiç kuşkusuz tarihi yapılar açısından sorumluluklarımız arasında en başta gelmektedir. Kubbeler taşıyıcı sistem ve yük aktarım şekillerine göre yedi farklı gruba ayrılmaktadır. Bunlar; 1. Yığma kubbeler, 2. Kabuk kubbeler, 3. Kaburgalı kubbeler, 4. Kablo destekli kubbeler, 5. Çubuk ağı kubbeler, 6. Kemer taşıyıcılı kubbeler ve 7. Pnömatik kubbelerdir. Bu çalışma Osmanlı yığma kubbeleri baz alınarak yapılmıştır. Yığma kubbenin etek kısmında açılma yapmaması için, yanal hareketi engellenmiş mesnetlere ihtiyaç vardır. Kubbede yükler, meridyenler doğrultusunda basınç gerilmesiyle mesnetlere iletilir. Kubbe ayakları mesnet yüklerinin düşey bileşenlerini kemerlere,

### Abstract

Historical buildings are types of buildings that reflect the culture, history, economic and social characteristics, beliefs of the period they are in. Dome type structures, which are among these building types, are curvilinear cover systems made to pass large openings. In order to transfer historical structures to future generations, structures should be protected and their structural behavior should be well known. In this study, an experimental study was carried out to examine the strengthening of dome structures by using clamps. Firstly, the behavior of the 2 m diameter and 1 m high octagonal pulley dome under vertical load was investigated. When the dome reached its load-bearing capacity, some cracks occurred on the dome. These damages were repaired by using clamp connectors. The dome strengthened with clamps was tested again under vertical load. The testing results of the reference and the clamp-reinforced domes are compared. As a result of the study, it has been determined that the clamp-applied strengthening method, which is frequently used in the repair and strengthening of dome structures, does not increase the bearing capacity.

**Keywords:** Historical structures, Masonry dome, Strengthening, Clamp application

yanal bileşenlerini ise kemer düzlemlerine dik doğrultuda yerleştirilmiş yarım kubbeler ve payandalara iletir. Yığma kubbelerde genelde kubbe yüksekliğinin alttan % 60'lık kısmında yatayda çekme, üstte kalan % 40'lık kısmında ise yatayda basınç gerilmeleri oluşmaktadır.

Ülkemizdeki tarihi yapıların birçoğu, çok iyi durumda değildir. Depremler, yangınlar, zemin kaynaklı problemler, çevre faktörlerinin oluşturduğu fiziksel ve kimyasal bozulmalar bu yapıların taşıyıcı sistem özelliklerini ve görüntülerini olumsuz yönde etkilemiştir. Bunun yanında taşıyıcı sistemdeki düzensizlik ve süreksizlikler nedeniyle pek çok tarihi yapıda çatlaklar ve onun sonucu kısmen veya tamamen yıkılmalar meydana gelmiştir. Tarihi yapıların gelecekte de ayakta kalabilmesi için bu yapıların korunması ve kubbe formlarının yapısal davranışının bilinmesi gerekmektedir. Tarihi yapıların çekme dayanımı düşük basınç dayanımları ise yüksektir. Bu yapıların çekme dayanımlarını arttırmak için, özellikle kubbeli yapılarda, minarelerde, yığma duvarlarda, köprülerde, sütunlarda meydana gelen geniş çatlakların onarım ve güçlendirilmelerinde kenet, zıvana gibi çekme dayanımı

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sukran\_tugrulelci@hotmail.com (Ş. Tanrıverdi)  
Geliş / Received: 22.02.2022 Kabul / Accepted: 25.03.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1077401

yüksek metal bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada, günümüzde özellikle tarihi kubbe yapılar üzerinde kenetlerle uygulanan dikiş yönteminin yapı üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk önce 2 m çapında 1 m yüksekliğinde bir kubbe yapılmış; bu kubbenin düşey yük altında taşıma kapasitesi tespit edilmiştir. Taşıma kapasitesine ulaşırken, hasar alan kubbe üzerine kenet ile dikiş yöntemi uygulanmış ve arkasından düşey yük altında deneye tabi tutulmuştur. Yapılan deney sonucunda elde edilen veriler, referans kubbe için yapılan deneyden elde edilen veriler ile kıyaslanarak dikiş yönteminin restorasyon, onarım ve güçlendirme çalışmalarında kullanımı tartışılmıştır.

Yapıların geleceğe devredilmesi için sabit, hareketli, deprem ve rüzgâr yüklerine karşı yapı taşıyıcı sistemlerinin güçlendirilmesi ve bu yüklerin incelenmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Yaldız vd. [1] Nevşehir İli'nde bulunan İbrahim Paşa Köyü'nde yer alan yağma konut üzerinde meydana gelen hasarları inceleyerek, onarım ve güçlendirme için hangi yöntemlerin nasıl uygulanması gerektiği konusunda önerilerde bulunmuşlardır. Fırat ve Eren [2], farklı şekillerde FRP malzemesiyle güçlendirilmiş altı adet hasarlı yağma kemer ile güçlendirilmemiş referans yağma kemerin düşey yük altındaki davranışlarını deneysel olarak inceleyip, sayısal modellemeleri ile karşılaştırmışlardır. Yağma kemerlerin onarım ve güçlendirilmesinde FRP'lerin nasıl uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Ottoni vd. [3], çalışmasında İtalya'da 16. yüzyılda yapılmış sekizgen kasnaklı kubbenin yapısal analizini gerçekleştirmiştir. Daha çok kubbe eteklerinde meydana gelen açılmaları engellemek amacıyla kubbe eteklerinde çekme çemberi uygulayarak sonlu elemanlar ile modellemiştir. Çalışma sonucunda çekme çemberinin kubbenin eteklerinde meydana gelen açılmaları önlediği ve kubbenin taşıma kapasitesini artırdığı tespit edilmiştir. Ural vd. [4] çalışmalarında biri referans beş tanesi de farklı tasarımda gergi çubukları ile güçlendirilmiş toplamda altı adet kemer numunesi üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışma sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılarak tarihi yapılarda kemerlerin onarım ve güçlendirmelerinde kullanılacak gergi tipinin nasıl olması gerektiği hususunda önerilerde bulunmuşlardır. Aghabeigi ve Tabar [5] Tebriz Çarşısı'ndaki Malek Timche tarihi binasını, yapının davranışını incelemek için Sonlu Elemanlar Metodu ile analiz etmiştir. Yapılan analizler sonucunda bina duvarlarında ve kubbelerinde uygulanması gereken onarım ve güçlendirme yöntemlerine karar verilmiştir. Özmen ve Sayın [6] Kütahya İli'nde bulunan tarihi Debboy yağma köprüsünün lineer dinamik analizlerini yaparak köprü'nün depreme karşı davranışlarını incelemişlerdir.

Literatür çalışmaları incelendiği zaman tarihi yağma yapıların davranışlarını inceleyen çalışmalarda bulunmaktadır. Tanrıverdi [7], doktora tezi çalışmasında kubbelerde kasnak yüksekliğinin ve kubbe pencere boşluk oranlarının kubbe davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla deneysel ve analiz çalışmaları yapmıştır. Çalışma sonucunda kasnak yüksekliğinin artmasıyla kubbenin taşıma kapasitesinin arttığı, yapmış olduğu yatay deplasmanın azaldığı tespit edilmiştir. Pencere boşluk oranının artmasıyla

kubbenin yük taşıma kapasitesinin azaldığı ve yatay deplasmanın arttığı belirlenmiştir. Sözen ve Çavuş [8] Yılanlı (Leylekli) tarihi köprüde deprem sonrası meydana gelen hasarlar sebebiyle geometrik formunda değişiklikler meydana gelmiştir. Bu sebeple yapının özgün formu ile değişikliğe uğramış formunun depreme karşı davranışlarını ANSYS sonlu elemanlar analizi ile modellemişlerdir. Çalışma sonucunda geometrik formunun değiştirilmesi ile yapının mimari ve estetik açıdan bozulduğu fakat deprem yüklerine karşı performansının olumlu etkilendiği tespit edilmiştir. Türker ve Yanık [9], sonlu elemanlar modeli ile İlyasbey Camii'nin deprem, sabit ve hareketli yükler etkisi altında analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çevresel titreşim testi sonuçlarına göre kalibre edilerek gerçekleştirilen analiz sonucunda yapıda oluşan basınç, çekme ve kayma dayanımları bulunmuştur.

Tarihi yapıların onarım ve güçlendirme çalışmalarında kenet ve zıvana gibi bağlantı elemanlarının kullanılmasıyla ilgili bilimsel çalışmalar yer almaktadır. Smoljanovic vd. [10] taş duvarların onarım ve güçlendirilmelerinde kullanılan kenet ve zıvana gibi bağlantı elemanlarının etkisini incelemek amacıyla sonlu-ayrık elemanlı sayısal model sunmuşlardır. Bu modelleme ile çelik kenet ve zıvanaların tarihi duvarların onarım ve güçlendirilmelerinde kullanılmasının depreme karşı yapıları oldukça koruduğu görülmüştür. Nikolic vd. [11] farklı tipteki (kenet, zıvana) bağlantı elemanları ile güçlendirilmiş taş bloktan oluşan deney numunelerinden elde edilen sonuçlara dayanarak, yük-yer değiştirme eğrileri temelinde geliştirilen bir sayısal model sunmuşlardır. Sayısal modelleme sonucunda kenet ve zıvanaların yapının taşıma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir. Baranaydın [12], Ephesos St. Jean Kilisesi'nde günümüzde ve geçmişte yapılan restorasyon tekniklerini inceleyerek benzerlik ve farklılıklarını gözlemlemiştir. Kilisedeki geniş çaptaki boşlukların kenet ile dikiş yöntemi uygulamasının yapıldığını, kenet malzemesi olarak hatalı malzeme kullanılmasıyla yapı üzerinde sıkıntılar meydana getirdiğine değinmiştir. Nikolic vd. [13] çalışmalarında Protiron anıtının ölçülerini küçülterek laboratuvar ortamında deneysel çalışma yapmışlardır. Kenet ve zıvanalar ile güçlendirilen anıtın sismik performansını incelemek için, sarsma tablası ile modelin sismik davranışının deneysel bir araştırması yapılmıştır. Kenet ve zıvanaların sismik direnci arttırmada ve yapının çökmeye karşı korunmasında özel bir rolü olduğu belirlenmiştir. Çelik vd. [14] tarihi yapıların onarım ve güçlendirilmelerinde sıklıkla kullanılan kenetlerin batma noktasının taşın kenarına olan mesafesi değişken olarak alınarak kenetlerin taş bloklar üzerindeki kayma dayanımlarını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılarak kenet batma derinliğinin taşın kenarına olan mesafesinin, taşın uzunluğuna oranının 0.2 değerinden küçük olmaması sonucuna varılmıştır. Ural ve Fırat [15] 12 Mart 2013 yılında Aksaray'da meydana gelen fırtına sonrasında yıkılan minareleri incelemişlerdir. Yine aynı şekilde Yetkin vd. [16] 24 Ocak 2020 yılında 6.8 büyüklüğünde meydana gelen Sivrice depremi sonrasında tarihi minarelerde meydana gelen hasarları inceleyerek sayısal modellemeler ile



analizlerini yapmışlardır. Her iki çalışmada da minarelerin yatay doğrultuda kenet, düşey doğrultuda ise zıvana gibi bağlantı elemanları ile güçlendirilerek minare üzerine gelecek çekme gerilmelerinin karşılanabileceğini vurgulanmıştır. Karabork ve Kocak [17] yığma taş duvarların kesme mukavemetini artırmak için farklı kenet tasarımı yaparak deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda kenetin yığma duvarın süneklik ve kesme mukavemetini etkili bir şekilde artırdığı belirlenmiştir.

Bu çalışmanın esas amacı; tarihi yığma kubbelerde görülebilen bazı çatlakların, kenet bağlantı elemanı kullanarak yapılan dikiş yöntemi ile ne oranda iyileştirilebildiğinin araştırılmasıdır. Bu bağlamda, laboratuvarında imal edilen ve referans olarak adlandırılan bir kubbe deneye tabi tutulmuştur. Deney sonucunda kubbe taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra bir takım çatlaklar meydana gelmiştir. Bu hasarlar, kenet ile dikiş yöntemi yardımıyla giderilmiş ve bu şekilde tamir edilmiş kubbe numunesi yeniden düşey yükler altında deneysel olarak incelenmiştir. Bu konu ile ilgili literatür de hiçbir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma, çelik kenet ile kubbelerin güçlendirilmesi konusunda ilk çalışma olmuştur. Deney sonuçları çelik kenet uygulamaları ile güçlendirme yönteminin kubbe yapı formlarında davranışını iyileştirmede ne kadar etkili olduğunu göstermesi açısından önemli bir başlangıç çalışması olacaktır.

## 2 Kubbe numunesinin hazırlanması

Kubbe deney numunesi çelik levha tablası üzerinde örülmüştür. Çelik levha tablası, uzunluğu 1100 mm olan 150x150 mm<sup>2</sup> kutu profil 7 adet ayak ile desteklenmiştir. Bu ayaklar kaynak yardımıyla çelik levha tablasına birleştirilmiştir. Örülen kubbe numunesinin çapı (2000 mm) boyutunda, çelik levha üzerinde plazma kesim ile boşluk oluşturulmuştur. Kubbe numunesini, çelik levha üzerinde örebilmek için yay şeklinde bükülerek birleştirilen çelik profilden kalıp yapılmıştır. 1990 mm çapındaki kalıbın, kubbe numuneler örüldükten sonra çelik levha üzerindeki boşluktan çıkartılabilmesi için, kubbenin çapından daha küçük yapılmıştır. Şekil 1’de kubbe deney numunesinin örümünde kullanılan çelik levha tablası ve kalıp olarak hazırlanmış çelik profil kalıp verilmiştir.



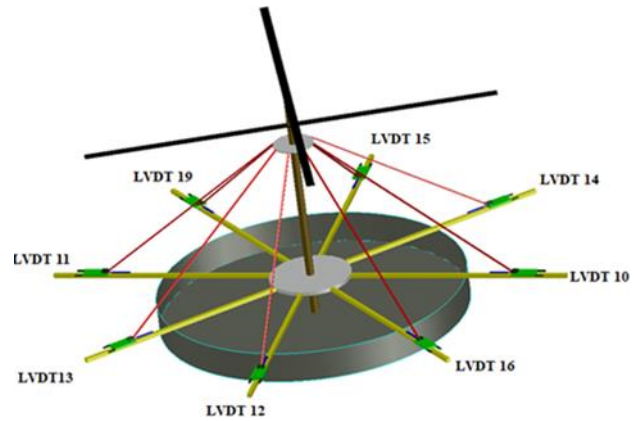
Şekil 1. Kubbe numunesinin örümünde kullanılan çelik levha tablası ve çelik profil kalıp

Şekil 2’de gösterildiği gibi kubbe deney numunesi örülmeden önce çelik levha üzerine 8 adet ahşap kalıp yapılarak dayanımı 25 MPa olan betonlar dökülmüştür. Beton kütleler ikişer adet doğrusal rulmanlara sonsuz dişli yardımıyla sabitlenmiştir. 750x100x100 mm<sup>3</sup> boyutlarındaki beton bloklar üzerine kubbe deney numunesini örme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Kubbe numune örümü için beton blokların üretimi ve yerleştirilmesi

Deneylerde meydana gelen yatay uzama ve kısalmaları ölçmek için 8 adet LVDT (Linear Variable Differential Transformer) ve kubbe üzerine gelen yükü ölçmek için kubbe tepesine yerleştirilen 50 ton kapasiteye sahip yük hücresi kullanılmıştır. Şekil 3’te kubbe numunesi üzerine LVDT’lerin nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir.



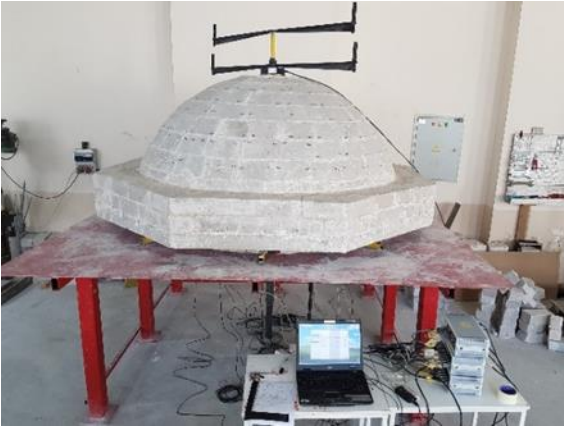
Şekil 3. Deney numunesine LVDT’lerin yerleştirilmesi

### 2.1 Referans kubbe

Çelik kenet uygulamalı dikiş yönteminin işlevselliğini incelemek için üzerinde çatlaklar bulunan bir kubbeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle bir adet kubbe elemanı örülmüş ve düşey yük altında üzerinde çatlaklar oluşturularak hasar verilmiştir.

Kubbe örme işleminde taşları birleştirmek için horasan harcı kullanılmıştır. Kullanılan harcin taş tozu/kireç/kum karışım oranı hacimsel olarak 4/4/2’ dir. Kubbe kısmında

taşın boyutları farklılık göstermiştir. Şekil 4’de kubbe modelinin genel geometrisi verilmiştir. Çapı 2000 mm olan kubbe numunesinin kasnak yüksekliği 200 mm olup kasnak genişliği 250 mm’dir. Deneysel çalışmada yükleme, şemsiye şeklinde mekanizma üzerinden düşey olarak yapılmıştır. 1300 mm uzunluğunda 20 mm çapında dairesel şeklindeki çelik profil kubbenin tam ortasından geçirilmiştir. Bu profilin 150 mm aşağısına, 400 mm uzunluğunda sonsuz dişli çelik profile geçirilmiştir. Şekil 4’de gösterildiği gibi kubbenin tepe noktasına 50 ton kapasiteli yük hücresi, sonsuz dişli içerisinden geçecek şekilde yerleştirilmiştir. Sonsuz dişliye sekiz boşluklu çelik halka bağlanmıştır. Bu çelik halkanın boşluklarına çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Şemsiye şeklindeki mekanizmaya yerleştirilen çelik çubuklar ile çelik profiller doğrusal rulmanlar ile sabitlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada yükleme şemsiye mekanizmanın üst tarafına yerleştirilen çevirme kolunun saat yönünün tersine çevrilmesiyle yapılmıştır. Uygulanan yük ile kubbelerde açılmalar gözlemlenmiştir. Kubbe üzerinde meydana gelen düşey yük şemsiye mekânizması üzerine yerleştirilen 50 ton kapasiteli yük hücresinden ölçülürken, yatay yer değiştirmeler de kubbe kenarına yerleştirilen LVDT’ler ile ölçülmüştür.

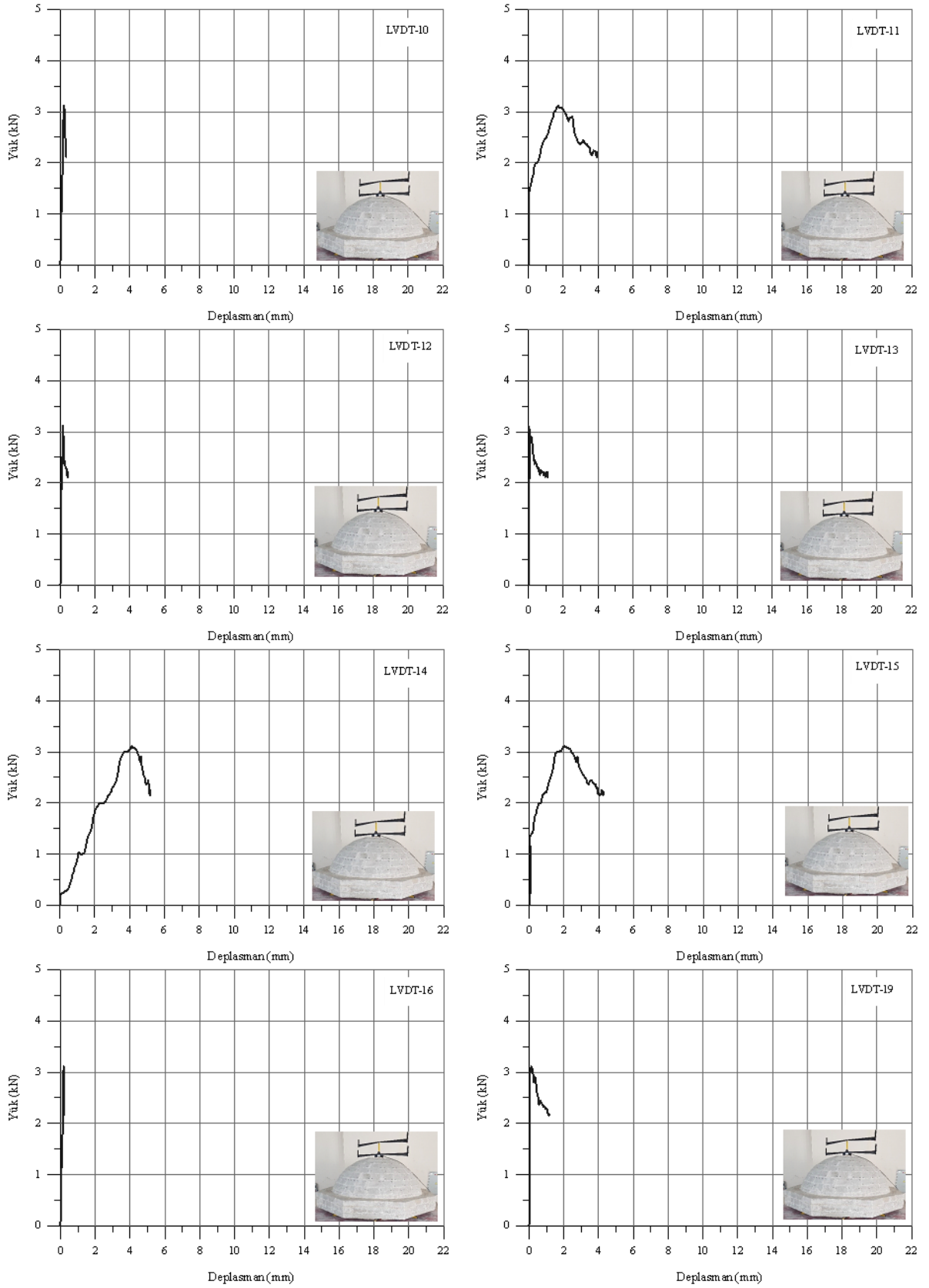


Şekil 4. Referans numunenin genel geometrisi

Deney düzeneğine, 8 adet yatay yer değiştirmeyi ölçmek için LVDT’ler yerleştirilmiştir. Şekil 5’de referans numunenin göçme sonucundaki hali gösterilmiştir. Çatlamlar kasnaklarda başlayıp, kubbe eteklerinde devam etmiştir. Derzlerde meydana gelen çatlakların genişliği 2-3 cm arasında değişmektedir. Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman grafikleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Referans numunede maksimum yük 3,11 kN olarak ölçülmüştür. Maksimum yüke ulaşıldığında maksimum yer değiştirme 4,121 mm olarak LVDT-14’den elde edilmiştir. Bu değeri 2,040 mm yer değiştirme yapan LVDT-15 takip etmektedir. Bu LVDT’ler çatlak genişliklerinin fazla olduğu yerlerde bulunan yer değiştirmeleri ölçmektedir. Şekil 6’da görüldüğü gibi deney sonucunda referans numune üzerine yerleştirilen LVDT’den en fazla yer değiştirme 5,176 mm ile LVDT-14’den ölçülürken en az yer değiştirme ise 0,331 mm ile LVDT-10’dan elde edilmiştir. En az yer değiştirme olan yerde çatlama kılcal şeklinde oluşmuştur.



Şekil 5. Referans deney numunenin göçme sonucundaki hali



Şekil 6. Referans kubbe yük-deplasman grafikleri



## 2.2 Kenet ile güçlendirilmiş kubbe

Hasar görmüş referans kubbenin derzlerinde meydana gelen küçük çatlaklar kubbenin örümünde kullanılan horasan harcı ile onarılmıştır. 8 mm'den daha geniş çatlakların bulunduğu bölgelere çelik kenet uygulaması yapılarak dikiş yöntemiyle güçlendirme uygulanmıştır. Dikiş yöntemi uygulamasında kubbe de oluşan 8 mm'den daha geniş çatlakların sağındaki ve solundaki taş 5 cm mesafe bırakılarak matkap yardımıyla delinmiştir. Delme işlemi tamamlandıktan sonra taş, hava püskürtme tabancasıyla temizlenmiştir. Şekil 7 (a)'da gösterildiği gibi taşın delinen kısımlarına çelik bağlantı elemanı olan kenetler yerleştirilmiştir. Kenetlerin yerleştirildiği boşluklar çimento şerbeti ile doldurmuştur. Şekil 7 (b)'de kenet uygulaması ve hasar görmüş kubbe üzerine uygulanan dikiş yöntemi gösterilmiştir. Kenet ile güçlendirilmiş kubbe üzerine referans kubbedeki gibi düşey yük uygulanmıştır.

Şekil 8'de kenet ile güçlendirilmiş kubbenin deney sonucundaki göçme halleri verilmiştir. Şekil 8'de görüldüğü üzere dikiş yöntemi ile yapılan güçlendirme çalışmasında en fazla hasar, kenetlerin yerleştirildiği bölgenin sağında ve solunda bulunan derzlerde meydana gelmiştir. Kenetin yerleştirildiği bölgenin sağında ve solunda bulunan derzlerde meydana gelen bu çatlaklar radyal şeklindedir. Deney sonrası göçme şekilleri incelendiği zaman kenet ile güçlendirilmiş kubbe üzerinde, referans kubbe olduğu gibi çekme bölgesinde ve basınç bölgesinde çatlakların oluştuğu görülmektedir. Her iki deneyde de kubbe taşı zarar görmemiştir. Kasnak kenarlarından başlayarak kubbenin basınç bölgesine kadar uzanan çatlamlar kubbe derzlerinde meydana gelmiştir.



(a)



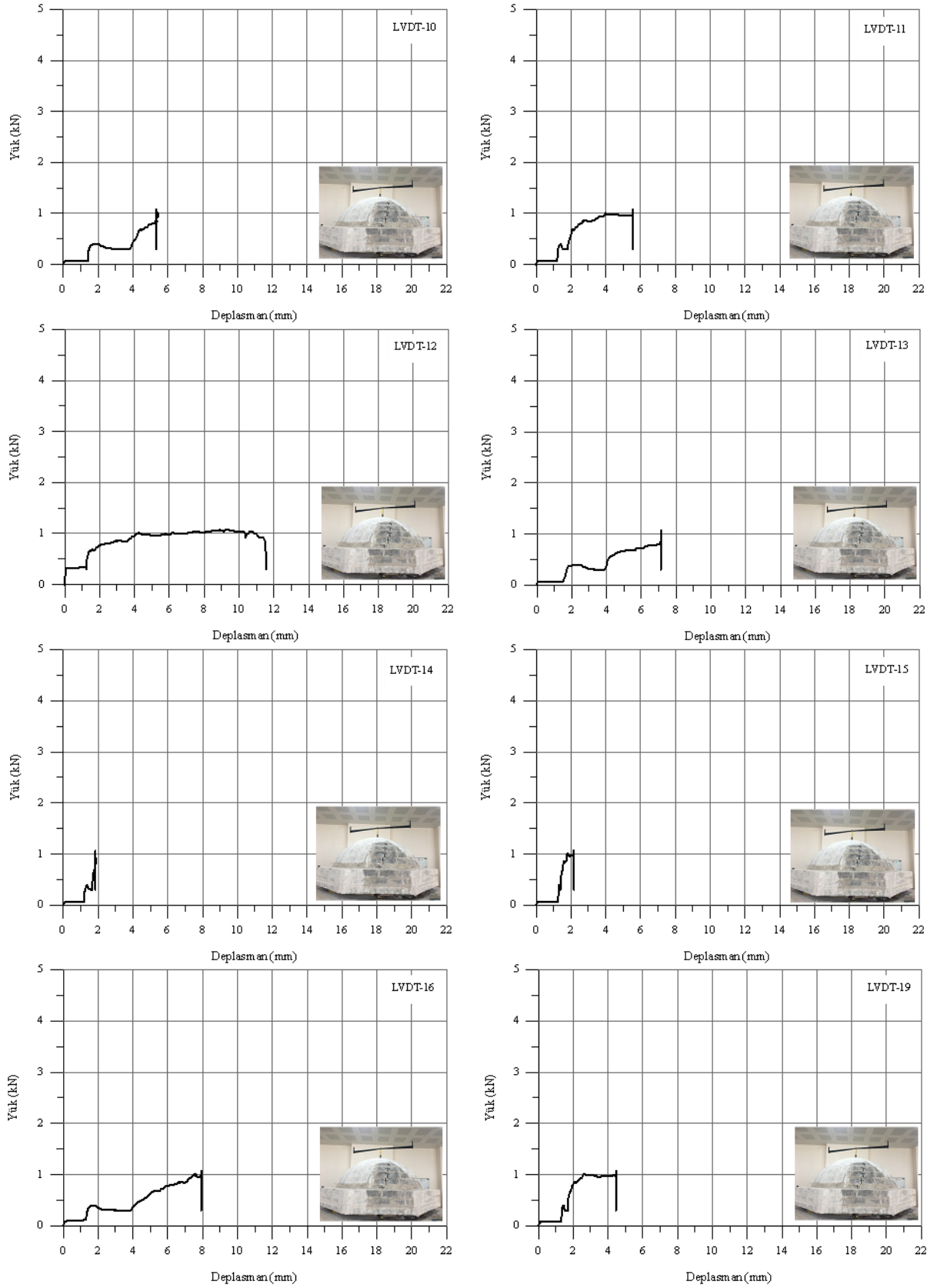
(b)

Şekil 7. (a) kubbe taşının delinmesi ve kenetin uygulanması, (b) dikiş yönteminin uygulanması



Şekil 8. Kenet ile güçlendirilmiş kubbe numunesinin deney sonucundaki hali





Şekil 9. Kenet ile güçlendirilmiş kubbe numunesinin yük-deplasman grafikleri

Şekil 9’da yük–deplasman grafikleri verilmiştir. Kubbe yaklaşık 1.18 kN yük taşımıştır. Maksimum yük altında maksimum deplasman 9.12 mm ile LVDT 12’de meydana gelmiştir. LVDT 12’den sonra maksimum deplasman sırası ile LVDT 16’da 7.91 mm ve LVDT 13’de 7.11 mm ölçülmüştür. Minimum deplasman LVDT 14’den 1.84 mm ve LVDT 15’den 2.17 mm elde edilmiştir. Tablo 1’de deney sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tablo 1’de görüldüğü gibi kenet ile güçlendirilen kubbe referans kubbeden daha az yük taşımıştır. Daha az yük taşınması ile birlikte referans kubbeye göre daha fazla yer değiştirme de yapmıştır.

**Tablo 1.** Deney sonuçları

Numune No	P <sub>r</sub> (kN) (Mak. Yük)	Artış <sup>a</sup> (%)	Mak.yüke karşılık gelen yatay yer değiştirme (mm)
Referans kubbe	3.11	0	4.12
Kenet ile güçlendirilmiş kubbe	1.18	-62.06	9.12

### 3 Sonuçlar

Bu çalışmada, günümüzde tarihi yığma kubbelerde görülen geniş çatlaklar üzerine kenet bağlantı elemanları kullanılarak uygulanan dikiş yönteminin, kubbenin davranışına etkisi araştırılmıştır. İlk olarak 2 m çapında 1 m yüksekliğinde sekizgen kasnaklı referans kubbe imal edilmiştir. Kubbenin en tepe noktasından etkiyen düşey yük altındaki referans kubbenin taşıma kapasitesi deneysel olarak incelenmiştir. Kubbe yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra, kubbe üzerinde çatlaklar meydana gelmiştir. Bu çatlaklar kenetler kullanılarak dikiş yöntemi ile giderilip, kenetli kubbe numunesinin düşey yük altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veriler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- ✓ Referans kubbe ve güçlendirme amaçlı kenetli dikiş yöntemi uygulanan kubbe karşılaştırıldığı zaman referans kubbe kenetli kubbeye göre daha fazla yük taşımıştır. Referans kubbe deney sonucunda maksimum 3.11 kN yük taşırken, dikiş yöntemi uygulanan kubbe 1.18 kN yük taşımıştır. Dikiş yöntemi uygulanmış kubbenin referans kubbeye göre yük taşıma kapasitesi %62.06 azalmıştır.
- ✓ Referans kubbeye çatlaklar kubbe kasnağının köşelerinde, kubbenin çekme ve basınç bölgelerinde meydana gelmiştir. Dikiş yöntemi uygulanan kubbeye ise çatlaklar genellikle kenet uygulamasının yapıldığı bölgenin sağında ve solunda meydana gelmiştir. Dikiş yöntemi uygulanan kubbeye çatlaklar referans kubbeye olduğu gibi kubbenin çekme ve basınç bölgesinde de gözlemlenmiştir.
- ✓ Kubbe kenet kullanılarak dikiş yöntemi ile güçlendirilmesine rağmen yapmış olduğu yatay yer değiştirme, referans deney numunesine oranla daha fazladır. Referans kubbenin maksimum yük altında yapmış olduğu yatay yer değiştirme 4.12 mm iken, dikiş yöntemi uygulanan kubbeye bu değer 9.12

mm olmuştur. Buradan kenet uygulamalı dikiş yönteminin taşıma kapasitesini arttırmamasına rağmen sünekliğe olumlu yönde etki ettiği sonucu çıkarılabilir.

Çalışma genel olarak değerlendirildiğinde;

Tarihi yapılarda kubbelerde onarım ve güçlendirmede çok sık kullanılan bir uygulama olan dikiş yönteminin kubbe üzerinde meydana gelen geniş çaptaki açılmaların daha fazla genişlemesini önlediği, fakat kubbenin yük taşıma kapasitesine olumlu bir katkı sağlamadığı tespit edilmiştir. Dikiş yöntemi uygulanan kubbe ile referans kubbeye meydana gelen çatlaklar ve açılmalar arasında bölgesel olarak bir fark görülmemiştir. İki durumda da kubbenin çekme hatta basınç bölgelerinde çatlaklar ve açılmalar gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile hasar görmüş kubbe yapılar bu şekilde uygulanan bir dikiş yönteminin iyi sonuçlar vermediği görülmüştür. Kubbenin yük taşıma kapasitesini arttırmak ve yatay yer değiştirmeyi azaltmak için kenet ile yapılan dikiş yöntemi ile birlikte kubbenin çelik çekme çemberi veya FRP gibi malzemelerle de güçlendirilmesi gerektiği düşünülmektedir. Bununla birlikte kenet uygulamalı dikiş yöntemi, tarihi yığma kubbelerin restorasyon ve güçlendirme çalışmalarında çok sık kullanılmaktadır. Bu çalışma piyasada yapısal uygulamalarda kullanılan şekliyle dikiş yönteminin bir güçlendirme yöntemi olarak düşünülmemesi gerektiği sonucunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte kenet boyutları, kenet bağlantı tipleri, kenet miktarları, çatlakların farklı malzemelerle doldurulması gibi taşıma kapasitesine etki edebilecek parametrelerin hasar görmüş kubbeler üzerinde taşıma gücü açısından nasıl etki edeceği ve dolayısıyla piyasa da uygulanan bir dikiş yönteminden farklı optimum faydayı sağlayacak yeni bir dikiş yönteminin önerilmesi üzerinde araştırma yapılması gereken bir konudur.

### Teşekkür

Bu çalışma Aksaray Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2018/035).

### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

### Benzerlik oranı (iThenticate): %9

### Kaynaklar

- [1] E. Yıldız, G. Yavuz ve Ü.S. Yılmaz, Tarihi taş yığma konutların güçlendirilmesinde kullanılan yöntemler: Ürgüp İbrahim Paşa Köyünden bir konut örneği. Engineering Sciences Dergisi, 6 (4), 1033-1052, 2011.
- [2] F.K. Fırat ve A. Eren, Tarihi yığma yapılarıdaki hasarlı kemerler üzerinde FRP etkisinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(4), 659-670, 2015. <https://doi.org/10.17341/gummfd.46980>.
- [3] F. Ottoni ve C. Blasi, Hoping as an ancient remedy for conservation of large masonry domes. International Journal of Architectural Heritage, 10 (2-3), 164-181,

2016. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1113335>.
- [4] A. Ural, F.K. Fırat, Ş. Tuğrüleçli ve M.E. Kara, Experimental and numerical study on effectiveness of various tie-rod systems in brick arches. *Engineering Structures*, 110, 209-221, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.038>.
- [5] P. Aghabeigi, ve S. Farahmand-Tabar, Seismic vulnerability assessment and retrofitting of historic masonry building of Malek Timche in Tabriz Grand Bazaar. *Engineering Structures*, 240, 112418, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112418>.
- [6] A. Özmen, ve E. Sayın, Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 956-965, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.715121>.
- [7] Ş. Tanrıverdi, Taş kubbelerde pencere boşluğunun ve kasnak yüksekliğinin davranış ve dayanım üzerine etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray, 2020.
- [8] Ş. Sözen ve M. Çavuş, Tek açıklıklı tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprü örneği. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (1), 48-59, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.589223>.
- [9] T. Türker ve Y. Yanık, İlyasbey Camisi'nin yapısal davranışının çevresel titreşim testi ve sonlu eleman yöntemleriyle incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2), 1431-1453, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.627927>.
- [10] H. Smoljanović, Ž. Nikolić ve N. Živaljić, A finite-discrete element model for dry stone masonry structures strengthened with steel clamps and bolts. *Engineering Structures*, 90, 117-129, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.004>.
- [11] Z. Nikolic, L. Krstevska, H. Smoljanovic ve N. Živaljić, Modelling of the influence of metal connectors on the resistance of historical dry-stone masonry structures. *International Journal of Architectural Heritage*. 2019. <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1613455>.
- [12] F. Baranaydın, Ephesos St. Jean Kilisesi Kiborion sütunu 1963 yılı restorasyonuna güncel bir yaklaşım, *AMİSOS*, 5 (8), 31-50, 2020.
- [13] Z. Nikolic, L. Krstevska, P. Marovic ve H. Smoljanovic, Experimental investigation of seismic behaviour of the ancient Protiron monument model. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 48 (6), 573-593, 2019. <https://doi.org/10.1002/eqe.3149>.
- [14] T. Çelik, Ş. Tanrıverdi, A. Ural ve F.K. Fırat, Yığma yapılarda kullanılan kenetlerin yapı davranışına etkilerinin incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (3), 650-659, 2021. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.874494>.
- [15] A. Ural ve F.K. Fırat, Evaluation of masonry minarets collapsed by a strong wind under uncertainty. *Natural Hazards*, 76 (2), 999-1018, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1531-7>.
- [16] M. Yetkin, İ.Ö. Dedeoğlu ve Y. Calayır, 24 Ocak 2020 sivrice depremi sonrasında Elazığ ilinde bulunan minarelerde meydana gelen hasarların araştırılması ve değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33 (2), 379-389, 2021. <https://doi.org/10.35234/fumbd.838261>.
- [17] T. Karabork ve Y. Kocak, New metal connectors developed to improve the shear strength of stone masonry walls. *Structural Engineering and Mechanics*, 50 (1), 121-135, 2014. <http://dx.doi.org/10.12989/sem.2014.50.1.121>.





# Süper emici polimer katkılı alkalilerle aktive edilen geopolimer harçların özellikleri

## Properties of super absorbent polymer added alkali activated geopolimer mortars

Umur Korkut Sevim<sup>1</sup> , Müzeyyen Balçıklanlı Bankir<sup>2</sup> , Büşra Sinem Genç<sup>3,\*</sup> 

<sup>1,2,3</sup> İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 31200, Hatay Türkiye

### Öz

İskenderun Bölgesi'nde büyük miktarlarda açığa çıkan cürüfların kullanımı sürdürülebilir geopolimer üretiminin sağlanması açısından önemlidir. Çalışma kapsamında Granüle Yüksek Fırın Cürufu (YFC) alkalilerle aktive edilmiş ve Süper Emici Polimer (SEP) ilavesi ile içten kürlenme etkisi gerçekleştirilerek kuruma çatlaklarının sayısı ve boyutunun azaltılması ile dayanım artışına katkı sağlanması araştırılmıştır. Sodyum poliakrilat esaslı SEP taneciklerine doyma derecesine kadar su emdirildikten sonra 50 gr, 100 gr ve 150 gr olacak şekilde harç karışımlarına eklenmiştir. Silikat modülü sabit olan (1.5) ve sodyum konsantrasyonu %4, %6, %8 olarak değiştirilen alkali çözeltiler ile YFC aktive edilmiştir. Alkalilerle aktive edilen SEP katkılı harçların taze halde yayılma çapı ve sertleşmiş halde eğilme ve basınç dayanımları ile su emme kapasiteleri belirlenmiştir. %6 sodyum konsantrasyonunda 100 gr SEP içeren geopolimer numunelerin su emme kapasiteleri artarken basınç dayanımlarının kontrol numuneleri ile kıyaslanabilir olduğu belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre hem su emme kapasitesi (%7.4) hemde basınç dayanımı (26.8 MPa) yüksek olan, 50 gr SEP içeren ve 60°C'de kür edilen BS2/60°C/50gr kodlu numunedir. YFC'nin alkali aktivasyonu ile dayanım kazanması ile SEP'in su emme kabiliyetinden faydalanılarak su emme oranı, dolaylı olarak boşluk miktarı yüksek geopolimer numuneler üretilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Süper emici polimer, İçten kürlenme, Geopolimer harç, Alkali aktivasyonu

### 1 Giriş

Tüm dünya ülkelerinde olduğu gibi ülkemizde de teknolojinin ve sanayinin hızlı bir şekilde gelişmesi, sağladığı avantajlarla birlikte sanayi üretimi sonrası açığa çıkan yan ürünlerin neden olduğu depolama ve çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Bunun yanı sıra enerji tüketiminin de hızla artması ile beraber üretiminde ve kullanımında daha az enerjiye gereksinim duyulacak alternatif kaynaklara ihtiyaç duyulmuştur. Ülkemizde enerji tasarrufu konusundaki hassasiyetin artırılması ile bu konuda yapılacak olan çalışmalar için; daha detaylı araştırmaların yapılmasına olan gereksinim giderek artmıştır. Doğal kaynakların korunmasına duyulan ihtiyacın artması, çevresel

### Abstract

Usage of slags which is released in large quantities in the Iskenderun Region is important in terms of providing sustainable geopolimer production. In this study, Granulated Blast Furnace Slag (YFC) was activated with alkalis and internal curing effect was investigated with addition of Super Absorbent Polymer (SEP), decreasing drying cracks and contribution to the development of strength were investigated. Water impressed sodium polyacrylate-based SEP to the degree of saturation was added 50 gr, 100 gr and 150 gr into geopolimer mixtures. YFC was activated with alkaline solutions with a constant silicate modulus (1.5) and sodium concentration changed to 4%, 6%, 8%. The flow diameter, flexural and compressive strengths and water absorption capacities of the SEP added geopolimers were determined in fresh state of mortar. It was determined that the water absorption rate of 100 gr SEP added geopolimer samples at 6% sodium concentration increased, while their compressive strength was comparable to the control samples. According to the results, it is a BS2/60°C/50gr sample with a high water absorption capacity (7.4%) and a compressive strength (26.8 MPa), containing 50 gr SEP and cured at 60°C. Sustainable geopolimer samples with a high water absorption rate namely high void content were produced by making use of the water absorption ability of SEP with the strength of YFC with alkali activation.

**Keywords:** Super absorbent polymer, Internal curing, Geopolimer mortar, Alkali activation

açından alternatif nitelikte olabilecek malzeme arayışını arttırmakla birlikte özellikle endüstriyel yan ürünlerin değerlendirilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Üretimi esnasında CO<sub>2</sub> salınımı açısından sorun teşkil eden Portland çimentosuna (PÇ) alternatif olarak Yüksek Fırın Cürufu (YFC), uçucu kül (UK), silika dumanı (SD) gibi yan ürünler farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olduklarından katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [1]. Yan ürün olarak açığa çıkan malzemelerden biri olan cüruf Türkiye'de bulunan 3 adet entegre demir-çelik fabrikasından sağlanmaktadır. Bunlardan biri olan İskenderun Demir-Çelik fabrikasında çelik üretimi sırasında çeşitli formlarda cürüflar açığa çıkmaktadır. Çıkan ürünün bir kısmı çimento

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: busragenc.mfbe19@iste.edu.tr (B. S. Genç)  
Geliş / Received: 23.11.2021 Kabul / Accepted: 24.01.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1027438



üretiminde kullanılmakta ancak bir miktarı da farklı alanlarda kullanılmayı beklemektedir. Cürufur günümüzde beton agregası olarak, klinker ile birlikte öğütülerek çimento üretiminde, dolgu malzemesi olarak ve yol çalışmalarında temel malzemesi gibi birçok alanda kullanım alanı bulmaktadır [2]. YFC'nin alkali aktivasyonunda reaksiyonların hızlanması için sıcaklık kürü uygulaması yapılmaktadır. Fakat bu sıcaklığa maruz kalma esnasında harç numune yüzeyinde ve iç bölgelerinde mikro çatlaklar meydana gelebilmekte, düşük dayanım ve yüksek geçirimsizliğe sebebiyet vermektedir. Çalışma kapsamında hiç çimento içermeyen ve YFC'nin alkali aktivasyonu ile yüksek oranda hacim artışı yapabileceği kabiliyeti olan SEP'nin farklı oranlarda kullanılması ile boşluk yapısının artırılması ve bünyesine aldığı su sayesinde içten kürlenmeyi sağlayan harç üretimleri yapılmıştır. Üretilen harç numunelerine iki tür kür uygulanmıştır. Birinci grup laboratuvar ortamında kür edilmiş, ikinci grup ise 60°C sıcaklıktaki etüvde 4 saat bekletildikten sonra laboratuvar koşullarına alınmıştır. Böylece sıcaklık sebebi ile oluşan çatlakların etkisi gözlemlenebilmiştir.

Bu araştırmanın konusuyla ilgili olarak yapılmış önceki çalışmalar incelendiğinde; Chen vd. [3] tarafından SEP'in cürufur bazlı geopolimerler üzerinde mekanik özelliklerini nasıl geliştirdiğini incelediği çalışmada; %12 sabit aktivatör oranına sahip ve silikat modülü 1 olarak hazırlanan cürufur harç numuneleri için 3 ve 28 günlük çekme-basınç mukavemetleri ölçülmüştür. Karışımlara SEP eklenmesinin cürufur bazlı geopolimerlerin mukavemeti üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu ifade edilmiştir. 28 günlük periyottaki etkinin daha önemli olduğunu belirtmişlerdir. Sürenin uzamasıyla, SEP çökeltisindeki suyun, hidrasyon reaksiyonuna devam ettiği, böylece mukavemetin arttığı, bu nedenle test numunesinin 28 günlük basınç mukavemetinin referans numunesine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak SEP dozajının doğrusal olarak artmasıyla test numunesinin kopma mukavemetinin değişmediğini ifade etmişlerdir. Bunun sebebinin, aşırı SEP muhtevası olabileceği, bulamaç kıvamının çok yüksek olmasından dolayı kolay kılınmamasına neden olabileceği şeklinde açıklanmıştır. Al-Nasra tarafından yapılan çalışmada [4], SEP katkılı betonun ısı transfer özellikleri araştırılmıştır. Beton karışımında beton dayanımına göre optimum miktarda SEP kullanılmıştır. Çalışmada işlenebilirlik ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Beton basınç dayanımı söz konusu olduğunda, SEP'nin çimentoya ağırlıkça %0.11 oranında katılmasının en etkili oran olduğu bulunmuştur. SEP'nin beton karışımında kullanılması, iç kürlenme işlemi nedeniyle beton dayanımını artırma potansiyeline sahiptir. Beton kürünün yeterli olmadığı durumlarda avantajlı hale gelebileceği belirtilmiştir. Beton karışımında aşırı miktarda SEP kullanımı, basınç dayanımı üzerinde önemli derecede olumsuz etkiye sahiptir. Bu tür bir katkı kullanılarak beton stabilitesinin ve betonda meydana gelebilecek ayrışma olasılıklarını azalttığı durumlarda jelin büyük agregalara yastıklama sağlayabileceği ve donma direnci, su genleşmesi ile oluşan hidrolik basıncın absorbe edilebileceği belirtilmiştir. Beton karışımında SEP kullanılarak betonun ısı yalıtım özelliklerinin önemli ölçüde iyileştirilebileceği

açıklanmıştır. Al-Nasra ve Daoud tarafından yapılan çalışmada [5], betonda SEP kullanımının taze ve sertleşmiş betonun özellikleri üzerinde birçok olumlu etkiye sahip olduğu kanıtlanmıştır. SEP'nin betona katkıda bulunabileceği en büyük iyileştirmelerden birinin, dahili su kaynağı sağlamak olduğu ifade edilmiştir. Bu dahili su kaynağı, beton son prizini aldıktan sonra dahili kürlenme ajanı görevi görür. Aynı zamanda SEP, beton taze halde iken nispeten daha yavaş bir hızda su salmaktadır. SEP ayrıca beton kütlede ilave boşluklar oluşturur. Bu boşluklar beton dayanımını olumsuz etkilerken betonun işlenebilirliğini ve yerleştirilebilirliğini iyileştirerek, betonun donma çözülme döngülerine duyarlılığını azaltarak ve beton stabilitesini artırarak beton performansını iyileştirir. Manzur vd. [6] geliştirmekte olan ülkelerde, dayanıklılık sorunları olan zayıf betonlar ile yapı inşaa edilmesi ve bunun dışında suyun bulunmaması veya vasıflı işçinin olmaması nedeniyle uygun harici sertleştirme sürecini sürdürmek zor olduğundan, dahili sertleştirme yönteminin çözüm olabileceği düşüncesi ile çalışma yapılmıştır. Bu amaçla içten kürlenmiş beton üretiminde SEP kullanılmıştır. SEP'in desorpsiyon izotermi, dahili kürlenme ajanı olarak etkinliğini araştırmak için geliştirilmiştir. Desorpsiyon testinden, SEP'in suya daldırıldığında kendi ağırlığından büyük miktarda su emdiği ve daha sonra emilen suyu nispeten yüksek sıcaklıkta ve düşük bağıl nemde serbest bırakabildiği belirtilmiştir. Test sonuçları, SEP ile dahili olarak kürlenmiş betonun, harici kürlenme için ilave su tedarikinin olmadığı olumsuz kürlenme koşullarına tabi tutulduğunda kontrol numunelerine kıyasla hem mukavemet hem de dayanıklılık açısından daha iyi performans gösterdiğini belirtmiştir. Mahmut vd. tarafından yapılan çalışmada [7], çimento inceliğinde öğütülmüş Elazığ ferrokrom cürufunun NaOH-Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılarak 40, 65 ve 90 °C kür sıcaklığında alkallerle aktive edilmiş harç üretim potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır. Kullanılan alkali aktivatörler 6, 9 ve 12 mol olacak şekilde kullanılmış olup aktivasyon sıcaklıkları 1, 2 ve 4 gün süreyle uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda çimento kullanmaksızın bağlayıcı olarak Elazığ ferrokrom cürufunun kullanıldığı 15 MPa dayanım değerinin üzerinde alkali aktive edilmiş harç üretilebileceği sonucuna varılmıştır. Ekinci vd. [8] yaptığı çalışmada, kullanılan ham madde ve alkali aktivatör özelliklerinin geopolimer hamurların basınç dayanımı özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Geopolimer hamur numunelerinde ham madde olarak F sınıfı UK ve YFC kullanılmıştır. Birbiri içerisinde değişik oranlarda karışımları yapılarak hazırlanan ham maddeler, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH kullanılarak aktive edilmiştir. Üretilen numunelerin 7 ve 28. günlerdeki basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Sonuçlara göre kullanılan ham madde ve alkali aktivatör özelliklerinin değişmesiyle birlikte basınç dayanımı değerlerinin büyük oranda değiştiği ifade edilmiştir. YFC ikame oranının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde ciddi artışlar gözlemlendiği belirtilmiştir. F sınıfı UK kullanılarak üretilen geopolimer örneklerinde ise laboratuvar şartlarında yüksek dayanım özelliklerine sahip olmaları için ısı küre ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Kullanılan ham madde tipinden bağımsız olarak, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ile aktive edilen tüm örnekler, 28 günlük nihai dayanımının %85'den

fazlasını ilk 7 gün içerisinde kazanıldığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra maksimum basınç dayanımının elde edilmesi için kullanılması gereken optimum NaOH konsantrasyonunun, bağlayıcı içeriğine bağlı olarak değişiklik gösterdiği saptanmıştır. Ziming He vd. tarafından yapılan çalışmada [9] SEP ile modifiye edilmiş çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirliğini ve mikro yapılarını inceleyerek SEP'in çimento esaslı malzemelerin reolojik özellikleri, mekanik özellikleri, büzülme, kendi kendini iyileştirme ve dayanıklılığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaya göre SEP'in çimento hidrasyonunu destekleyebildiği, suyu serbest bıraktıktan sonra çimentolu matris içinde çok sayıda boşluk bıraktığı belirtilmiştir. SEP ilavesinin, çimentolu kompozitlerin otojen büzülmesini önemli ölçüde azaltabileceği ve sertleşmiş çimentolu matriste çatlak oluşumunun SEP'in su emmesi ve şişmesi nedeniyle iyileşebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, SEP'lerin çimento esaslı kompozitlerde homojen olarak dağılıp boşluklar bırakabileceği, böylece matrisin donma direncini iyileştirebileceği belirtilmiştir. Elibol'un [10] yaptığı çalışmada, belirli su/bağlayıcı oranında YFC'nin farklı alkalilerle aktive edilmesi ile üretilen numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ve NaOH alkalilerinin etkilerini karşılaştırabilmek için aynı Na konsantrasyonunda harçlar üretilmiştir. Harçların 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı ve basınç dayanımı incelendiğinde, sadece çimento ile üretilen şahit numuneye en yakın mekanik dayanımı %100 YFC ile üretilip, NaOH ile aktive edilen harcın gösterdiği belirlenmiştir. Çalışmada üretilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarına bakılarak en uygun Na konsantrasyonunun %5 olduğunu belirtilmiştir. Ayrıca ilk değerlendirmelerde alkalilerle aktive edilen harçların 7 günlük basınç dayanımlarının düşük olduğu gözlenmiştir. Erken yaş dayanımını artırmak için harç numuneler ilk 3 ve 7 gün sıcak kür suyunda bekletilmiştir. Sıcaklıkları 40 °C, 60 °C ve 80 °C ile değişen kür havuzlarında bekletilen numunelerin basınç dayanımları daha önce 20°C'de kürlenmiş numunelerle karşılaştırılmıştır. Sıcaklık seviyesi ve sıcak kür havuzunda bekletilme süreleriyle doğru orantılı olarak basınç dayanımlarının arttığı ifade edilmiştir.

YFC'nin alkali aktivasyonu esnasında sıcaklık kürrü etkisi ile suyun buharlaşıp bünyeden uzaklaşması neticesinde çok sayıda yüzey çatlaklarının oluştuğu yapılan literatür çalışmaları [11] ve deneysel ön çalışmalar ile belirlenmiştir. Bu çatlaklar geopolimerin dayanım ve dayanıklılık kaybına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle çalışma kapsamında içten sürekli kürlenmeyi sağlayarak ani kurumayı önleyen, çatlak oluşumunu sınırlayan SEP katkısı kullanılarak geopolimer harç numuneler üretilmiş ve harçların performansı fiziksel ve mekanik özellikler açısından değerlendirilmiştir. YFC'nin alkali aktivasyonundan farklı ve ilave olarak SEP'in yüksek oranda su emme kabiliyetinden faydalanılarak hem geçirimsizliği hemde dayanımı nispeten yüksek olan geopolimer harç numune üretimleri yapılmıştır.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Materyal

Bu çalışmada; İskenderun Demir-Çelik Fabrikası yan ürünü olan YFC ile kırmataş, su, alkali aktivatör olarak sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ve sodyum hidroksit (NaOH) ve ek olarak süper emici malzeme olan sodyum poliakrilat (C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub>)<sub>n</sub> kullanılmıştır. YFC aktivasyonu için; üretim sırasında Na konsantrasyonu %4, %6, %8 oranlarında; silikat modülü de 1.5 oranına sahip alkali çözeltiler hazırlanmıştır. Karışım oranları ile ilgili detaylı bilgi Tablo 3'te verilmiştir. MH-1, MH-2, MH-3 olarak isimlendirilen numuneler; YFC, agrega, su, NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> kullanılarak hazırlanan referans numunelerini ifade etmektedir. BS-1, BS-2, BS-3 numuneleri ise SEP eklenen numuneleri ifade etmektedir. Her karışımdan üretilen numuneler laboratuvar şartları (23 °C) ve 60 °C olmak üzere iki farklı grupta kür edilmiştir. 24 farklı harç karışımı hazırlanmış olup her karışımdan üçer numune test edilmiştir ve toplamda 72 adet numune üretilmiştir.

#### 2.1.1 Yüksek fırın cürufu

Çalışmada kullanılan YFC İskenderun Demir-Çelik Fabrikasından temin edilmiştir. YFC'nin yoğunluğu 2.89 g/cm<sup>3</sup> ve Blaine inceliği 540 m<sup>2</sup>/kg'dır. YFC'nin kimyasal özellikleri Tablo 1'de detaylı olarak gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

Bileşen	Analiz Sonuçları (%)
SiO <sub>2</sub>	43.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.74
CaO	36.24
MgO	6.10
SO <sub>3</sub>	0.60
S <sup>-2</sup>	0.51
Na <sub>2</sub> O	0.28
K <sub>2</sub> O	0.74
Na <sub>2</sub> O+0.658K <sub>2</sub> O	0.76
Kızdırma Kaybı	0.01
Serbest Kireç	-

#### 2.1.2 Alkali aktivatörler

Bu çalışmada Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ve NaOH kullanılmıştır. Bu alkalilerin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2'de detaylı olarak verilmiştir. NaOH katı formda ve beyaz renkli, suda iyi çözünen bir kimyasaldır. Şekil 1-c'de kullanılan NaOH gösterilmiştir. Cam suyu olarak adlandırılan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> ise katı ve sıvı renksiz veya yeşil renkte olabilmektedir. Suda çözüldüğünde Şekil 1-d 'de olduğu gibi şurupsu, koyu renkte bir sıvı şeklinde görülmektedir.

#### 2.1.3 Sodyum poliakrilat

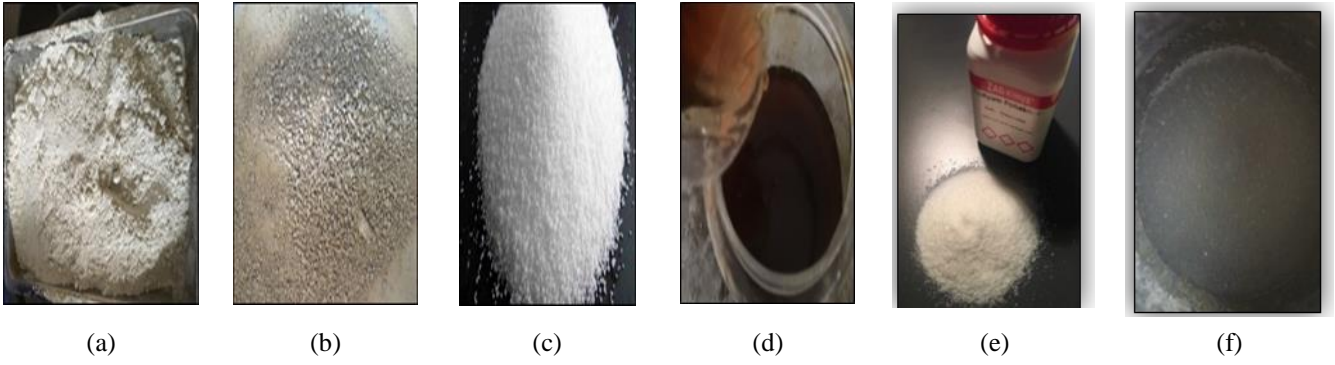
Süper emici olarak da adlandırılan sodyum poliakrilatın su emiciliği kendi ağırlığının yaklaşık 200-300 katı kadardır. Şekil 1.e'de kullanılan SEP gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Sodyum silikat ve Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal kompozisyonu [11]

	Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	Analiz Sonuçları
Sodyum Silikat	Görünüşü	Renksiz, berrak, kıvamlı sıvı
	Molekül Ağırlığı ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ )	3.19
	Molekül Modeli ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ )	3.30
	20 °C	39.4
	Yoğunluk	1.373
	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	8.52
Sodyum Hidroksit	$\text{SiO}_2$ (%)	27.09
	Toplam Alkalinite ( $\text{NaOH}$ ) (g/kg)	$\geq 990$
	Sodyum Karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (g/kg)	$\leq 4$
	Sodyum Sülfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) (mg/kg)	$\leq 80$
	Sodyum Klorit ( $\text{NaCl}$ ) (mg/kg)	$\leq 200$
	Demir (Fe) (mg/kg)	$\leq 10$
	Civa (Hg) (mg/kg)	$\leq 0.1$
	Arsenik (As) (mg/kg)	$\leq 1$
	Kadmiyum (Cd) (mg/kg)	$\leq 1$
	Krom (Cr) (mg/kg)	$\leq 1$
	Kurşun (Pb) (mg/kg)	$\leq 0.5$
	Antimon (Sb) (mg/kg)	$\leq 5$
	Selenyum (Se) (mg/kg)	$\leq 5$
	Nikel (Ni) (mg/kg)	$\leq 2$

**Tablo 3.** Çalışmada uygulanan karışım tasarımı ( 1  $\text{dm}^3$  için karışım oranları )

	Silikat Modülü	Numune İsimleri	Sodyum Konst.	Deney Sınıflandırma	Kür Sıcaklığı	YFC (gr)	Agrega (gr)	Su (gr)	NaOH (gr)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (gr)	SEP Oranları (gr)
Katkısız (Referans) Numuneler	MH-1	4	MH-1/23 °C	23°C	520	1420	165	18	150	0	
			MH-1/60 °C	60°C	520	1420	165	18	150	0	
	MH-2	6	MH-2/23 °C	23°C	520	1420	117	27	223	0	
			MH-2/60 °C	60°C	520	1420	117	27	223	0	
	MH-3	8	MH-3/23 °C	23°C	520	1420	70	36	298	0	
			MH-3/60 °C	60 °C	520	1420	70	36	298	0	
Katkılı Numuneleri (Süper Emici)	1.5	BS-1	4	BS-1/23 °C/(50 gr)	23°C	520	1420	165	18	150	50
				BS-1/23 °C/(100 gr)	23°C	520	1420	165	18	150	100
				BS-1/23 °C/(150 gr)	23°C	520	1420	165	18	150	150
		BS-1/60 °C/(50 gr)	60°C	520	1420	165	18	150	50		
		BS-1/60 °C/(100 gr)	60°C	520	1420	165	18	150	100		
		BS-1/60 °C/(150 gr)	60°C	520	1420	165	18	150	150		
	BS-2	6	BS-2/23 °C/(50 gr)	23°C	520	1420	117	27	223	50	
			BS-2/23 °C/(100 gr)	23°C	520	1420	117	27	223	100	
			BS-2/23 °C/(150 gr)	23°C	520	1420	117	27	223	150	
			BS-2/60 °C/(50 gr)	60°C	520	1420	117	27	223	50	
			BS-2/60 °C/(100 gr)	60°C	520	1420	117	27	223	100	
			BS-2/60 °C/(150 gr)	60°C	520	1420	117	27	223	150	
	BS-3	8	BS-3/23 °C/(50 gr)	23°C	520	1420	70	36	298	50	
			BS-3/23 °C/(100 gr)	23°C	520	1420	70	36	298	100	
			BS-3/23 °C/(150 gr)	23°C	520	1420	70	36	298	150	
			BS-3/60 °C/(50 gr)	60°C	520	1420	70	36	298	50	
			BS-3/60 °C/(100 gr)	60°C	520	1420	70	36	298	100	
			BS-3/60 °C/(150 gr)	60°C	520	1420	70	36	298	150	



Şekil 1. a) Yüksek fırın cürufu, b) Kırmataş c) Sodyum hidroksit d) Sodyum silikat e, f) Sodyum poliakrilat



Şekil 2. Harç numunelerinin yayılma testi

## 2.2 Metot

Üretilen harçların alkali çözelti özellikleri literatür çalışmalarından edinilen bilgiler ışığında belirlenmiştir. ASTM C109'da [12] belirtilen çimento: agrega ve su oranına benzer şekilde YFC: agrega: alkali çözelti şeklinde sırası ile 1:2.75:0.485 olarak seçilmiştir. Harç üretiminde kullanılan alkali aktivatör çözeltideki NaOH konsantrasyonu mevcut  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  çözeltisine ilaveten pelet haldeki NaOH'ın dışarıdan ilavesi ile tasarlanan derişime getirilmiştir. YFC'nin alkali aktivasyonu için silikat modülü (Si/Na oranı) 3 olan sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) çözeltisinin bünyesindeki sodyum konsantrasyonunu değiştirmek için dışardan ilave olarak %99 saflıktaki NaOH ilave edilmiştir. Böylece alkali çözeltide bulunan sodyum derişimi istenilen Tablo 3'de belirtilen oranlara getirilmiştir. Süper emici poliakrilatı hazırlamak için öncelikle 10 gr SEP içerisinde 1000 gr su eklenerek karışımın içerisindeki SEP'in tamamen su ile dolması beklenmiştir. Suyu emen SEP malzeme doymun halde 50, 100 ve 150 gr olacak şekilde tartılarak harç karışımına eklenmiştir. Homojen karışımın elde edilmesinin ardından hazırlanan harç karışımının kıvamını belirlemek için yayılma tablası testi yapılmıştır. Burada harç iki aşamalı olarak kesik koni şeklinde kalıba yerleştirilip üzeri düzeltildikten sonra 15 kez düşürülerek yayılan taze haldeki harcın çapı x ve y doğrultusunda en geniş kısımları alınarak ölçülüp kaydedilmiştir.

Farklı harçların kıvamları Şekil 2'de gösterilmektedir. Üretilen harçlardan 40x40x160 mm boyutlarındaki kiriş numuneler üretilmiş ve bu numuneler üzerinde TS EN 196-1'e [13] uygun şekilde eğilme ve basınç testleri yapılmıştır.

Harç numune üretimlerine ait fotoğraflar Şekil 3 ve Şekil 4'de gösterilmiştir. Hazırlanan kiriş numuneler 24 saat boyunca priz alması için kalıplarda bekletilmiştir. Daha sonra kalıptan çıkarılan numunelerden bir grubu 23 °C'de laboratuvar ortamında, diğer grubu da 60 °C'de 4 saat süre ile kür edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 3. Hazırlanan harç numuneleri

Eğilme ve basınç dayanımının yanı sıra boşluk miktarı hakkında fikir sahibi olmak için harç numunelerin su emme oranları da belirlenmiştir. Numunelerin mevcut ağırlıkları ( $W_{ortam}$ ), 24 saat suda bekletilip yüzeyi kurutulduktan sonra doymun yüzey kuru ağırlıkları ( $W_{dyk}$ ) ve 24 saat etüvde tamamen kuruduktan sonraki ağırlıkları ( $W_k$ )



belirlenmiştir. Eşitlik (1)' deki eşitlik yardımı ile su emme kapasiteleri hesaplanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

$$\text{Su Emme Oranı (\%)} = \frac{W_{dyk} - W_k}{W_k} \times 100 \quad [12] \quad (1)$$

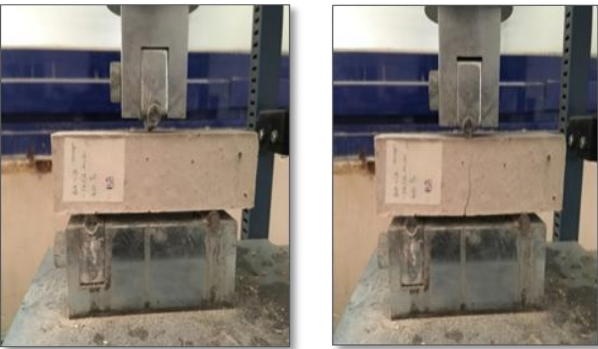


Şekil 4. Hazırlanan harç numuneleri

Uygulanan yük nedeni ile basma ve çekme kuvvetleri meydana geldiğinden numunelerde gözlemlenen eğilmenin ardından kırılma meydana gelmiştir. (Şekil 6). Her bir numune için aynı işlemlerin uygulanmasının ardından eğilme testi sonuçları kN olarak ölçülüp kaydedilmiştir. Numunelerin eğilme dayanımları Tablo 6' da verilmiştir.



Şekil 5. Harç numunelere sıcaklık kürü uygulanması

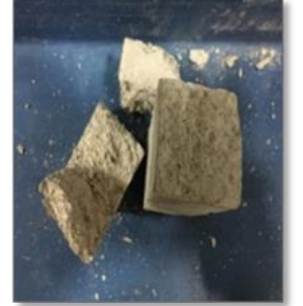


Şekil 6. Numunelerin eğilme deneyi

Eğilme deneyinde sonucunda iki parçaya ayrılan numuneler 40x40 mm press başlığı arasına Şekil 7'de görüleceği gibi yerleştirilip basınç testine tabii tutulmuştur (Şekil 8). Eğilme deneyinde 2 parçaya ayrılan numuneler üzerinde basınç testi uygulanmıştır. Numunelerin basınç dayanımları Tablo 7'de detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 7. Numunelere basınç yükü uygulanması



Şekil 8. Numunelerin basınç testi

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Yayılma tablası deneyi

Harç karışımlarının kıvamını belirlemek için taze harç yayılma tablasında 15 kez düşürüldükten sonra x ve y doğrultusundaki yayılma değerleri ölçülmüş, aritmetik ortalaması alınmış ve sonuçlar Tablo 4 ve Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 2'den görüldüğü üzere referans karışımının yayılma çapı düşük iken (Şekil 2-a), süper emici poliakrilat (SEP) miktarı arttıkça yayılma çapları da artış göstermiştir (Şekil 2-b,c,d). BS-3 (150 gr SEP)'i gösteren Şekil 2-d'de karışımında bulunan SEP miktarına bağlı yayılma çapı artmıştır. Benzer şekilde Al-Nasra ve Daoud tarafından yapılan çalışmada [5] SEP katkılı betonda homojen olarak

dağılmış küçük boşlukların olduğu ve daha kolay işlenebilir olduğu belirtilmiştir.

**Tablo 4.** Numunelerin yayılma çapları

Sodyum konsantrasyonu (%)	Harç numuneleri	Yayılma çapı (mm)
4	MH-1	130
	BS-1 (50 gr SEP)	175
	BS-1 (100 gr SEP)	185
	BS-1 (150 gr SEP)	236
6	MH-2	160
	BS-2 (50 gr SEP)	192.5
	BS-2 (100 gr SEP)	242.5
8	BS-2 (150 gr SEP)	245
	MH-3	145
	BS-3 (50 gr SEP)	205
	BS-3 (100 gr SEP)	240
	BS-3 (150 gr SEP)	292.5

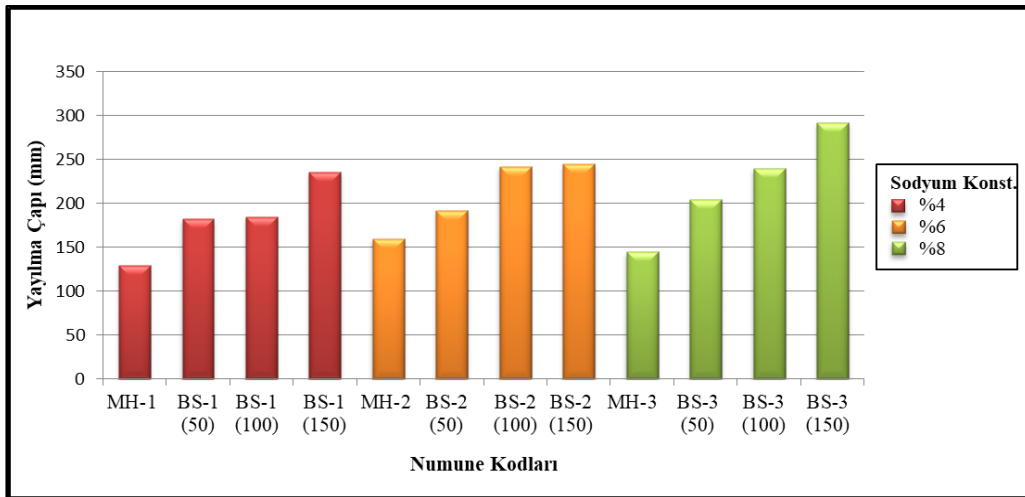
### 3.2 Su emme oranı

Karışım tasarımına uygun olarak hazırlanan numunelerin su emme oranları Tablo 5'te verilmiştir. Referans numuneleri olarak belirlenen yani içeriğinde hiç SEP bulunmayan MH-1, MH-2 ve MH-3 numunelerinde sodyum konsantrasyonunun artışı ile su emme oranları azalmıştır. Harç içerisine eklenen SEP miktarı arttıkça su emme oranları artmıştır. YFC'nin bağlayıcılık özelliğinin artması için eklenen alkali aktivatör çözeltisindeki sodyum konsantrasyonunun artışı SEP katkılı numunelerin etkisini düşürmüştür. Şekil 10'dan görüldüğü üzere 50 gr SEP eklenmiş numuneler içerisinde BS1 numunelerinin su emme oranları yüksek iken, sodyum konsantrasyonu artan numunelerde (BS-2, BS-3) daha düşüktür. 100 gr SEP içeren numunelerde sıcaklık kürü uygulanması ile su emme kapasiteleri artmıştır. 150 gr SEP içeren numunelerde sıcaklık kürü uygulanması ile su emme kapasiteleri azalmıştır. BS-2/23°C/150 gr numunesi en yüksek su emme kapasitesine sahipken sodyum konsantrasyonu artışı ile bu

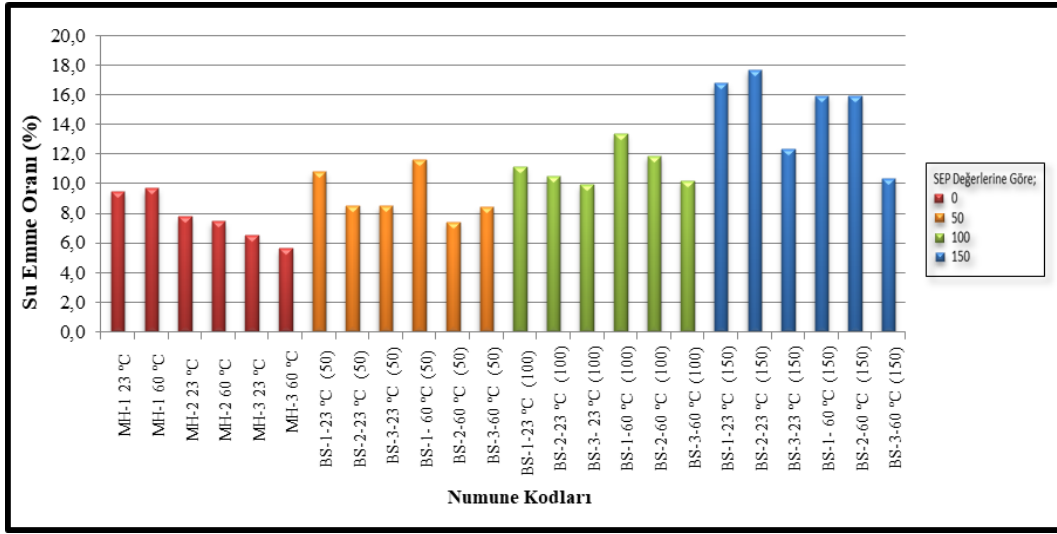
oranda düşüş görülmüştür. Sıcaklık kürü uygulanması numunelerin su emme kapasitelerini azaltan bir etki yapmıştır. Şekil 10'dan görüldüğü üzere uygulanan kür sıcaklığı arttıkça su emme oranlarında artışa neden olmuştur. Çünkü kür sıcaklığının yükselmesi ile numunede bulunan suyun buharlaşması sağlanmış ve numunenin en kuru durumdaki ağırlığı ile doymuş haldeki ağırlığı arasındaki fark açılmıştır. SEP'in bünyesindeki su hızlıca harç numune içerisinde salındığından içten kürlenmenin yavaş yavaş gerçekleşmesi engellenmiştir.

**Tablo 5.** Numunelerin su emme kapasiteleri

SEP Oranı (gr)	Harç Numuneleri	Su Emme Kapasitesi (%)
0	MH-1 23 °C	9.5
	MH-1 60 °C	9.7
	MH-2 23 °C	7.8
	MH-2 60 °C	7.4
	MH-3 23 °C	6.5
	MH-3 60 °C	5.6
50	BS-1/ 50 gr SEP / 23 °C	10.8
	BS-2/ 50 gr SEP / 23 °C	8.5
	BS-3/ 50 gr SEP / 23 °C	8.5
	BS-1/ 50 gr SEP / 60 °C	11.7
	BS-2/ 50 gr SEP / 60 °C	7.4
	BS-3/ 50 gr SEP / 60 °C	8.4
100	BS-1/ 100 gr SEP / 23 °C	11.1
	BS-2/ 100 gr SEP / 23 °C	10.5
	BS-3/ 100 gr SEP / 23 °C	9.9
	BS-1/ 100 gr SEP / 60 °C	13.4
	BS-2/ 100 gr SEP / 60 °C	11.9
	BS-3/ 100 gr SEP / 60 °C	10.2
150	BS-1/ 150 gr SEP / 23 °C	16.8
	BS-2/ 150 gr SEP / 23 °C	17.7
	BS-3/ 150 gr SEP / 23 °C	12.4
	BS-1/ 150 gr SEP / 60 °C	16.0
	BS-2/ 150 gr SEP / 60 °C	15.9
	BS-3/ 150 gr SEP / 60 °C	10.4



**Şekil 9.** Taze haldeki karışımların yayılma çapları



Şekil 10. Referans ve deney numunelerine ait su emme oranları grafiği

Yüksek kür sıcaklığında fırın etkisiyle yaş olan numuneler buharlaşmaya çalışırken, içerisindeki suyun buharlaşma için kendi yolunu bulması sonucu iç çatlaklar oluşur. Bu çatlaklardan giren su miktarına bağlı olarak su emme oranlarında artış olabileceği düşünülmüştür.

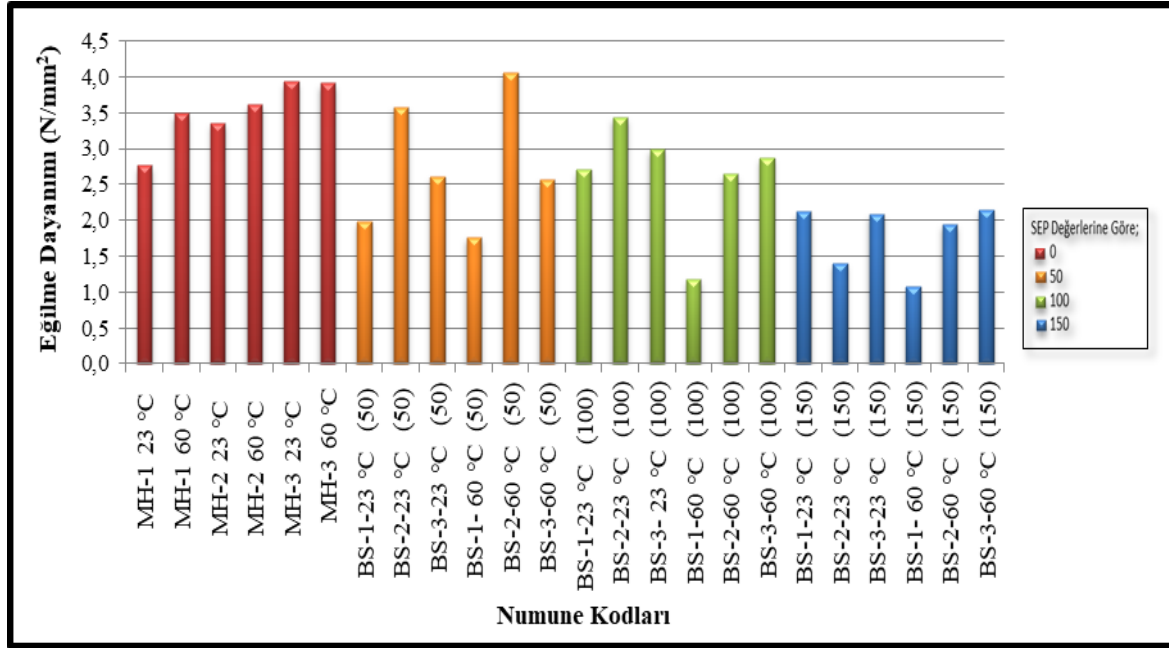
60 °C sıcaklık küründen çıkarılan numunelerde, içeriğinde düşük oranda SEP içeren ya da hiç SEP içemeyenlerde yüzey çatlaklarının olduğu gözlemlenmiştir. Ancak SEP oranı yüksek olan numunelerde bu yüzey çatlaklarının miktarında azalma olduğu görülmüştür. Yani SEP kullanımı ile karışımdaki suyun buharlaşması sonucunda oluşan kuruma çatlaklarının kontrol altına alınabildiği görülmüştür. Snoeck vd. tarafından yapılan çalışmada [14] SEP kullanımı ile çatlak sızdırmazlığının arttığı ifade edilmiştir.

### 3.3 Eğilme dayanımı

Deneysel çalışma sonucu elde edilen verilere göre Şekil 11'deki grafikte de görüleceği üzere SEP oranı arttıkça eğilme dayanımında azalma meydana gelmiştir. 50 gr, 100 gr ve 150 gr SEP ilave edilen numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak %4 sodyum oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarının azaldığı, %6 sodyum oranındaki numunelerde genel olarak artış gözlemlendiği (BS2/23/100 gr hariç) ve %8 sodyum oranına sahip numunelerin değişim göstermeden benzer dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Buradan YFC'nin dayanım kazanması için gerekli olan alkali ortamın sodyum konsantrasyonunun en az %6 olması gerektiği anlaşılmıştır. SEP ilave edilen numunelerin eğilme dayanımları kür sıcaklığına bağlı olarak değişmiştir. Genel olarak 60 °C kür sıcaklığına maruz kalan numunelerin eğilme dayanımları oda sıcaklığında kür edilen numunelere kıyasla daha düşüktür. Bu durumun nedeninin suyun buharlaşması ya da SEP bünyesindeki suyun yavaş yavaş salınması ile SEP'in kapladığı hacmin küçülmesi neticesinde yerini boşluğa bırakması olarak düşünülmektedir. Boşluklu bir yapının alkali aktivasyonun ilk evrelerinde meydana gelmiş olması numunenin eğilme ve basınç dayanımlarının düşük olmasına sebebiyet vermiştir.

Tablo 6. Numunelerin eğilme dayanımları

SEP Oranı (gr)	Harç Numuneleri	Eğilme Dayanımı (MPa)
0	MH-1 23 °C	2.8
	MH-1 60 °C	3.5
	MH-2 23 °C	3.4
	MH-2 60 °C	3.6
	MH-3 23 °C	3.9
	MH-3 60 °C	3.9
50	BS-1/ 50 gr SEP / 23 °C	2.0
	BS-2/ 50 gr SEP / 23 °C	3.6
	BS-3/ 50 gr SEP / 23 °C	2.6
	BS-1/ 50 gr SEP / 60 °C	1.8
	BS-2/ 50 gr SEP / 60 °C	4.1
	BS-3/ 50 gr SEP / 60 °C	2.6
100	BS-1/ 100 gr SEP / 23 °C	2.7
	BS-2/ 100 gr SEP / 23 °C	3.4
	BS-3/ 100 gr SEP / 23 °C	3.0
	BS-1/ 100 gr SEP / 60 °C	1.2
	BS-2/ 100 gr SEP / 60 °C	2.6
	BS-3/ 100 gr SEP / 60 °C	2.9
150	BS-1/ 150 gr SEP / 23 °C	2.1
	BS-2/ 150 gr SEP / 23 °C	1.4
	BS-3/ 150 gr SEP / 23 °C	2.1
	BS-1/ 150 gr SEP / 60 °C	1.1
	BS-2/ 150 gr SEP / 60 °C	1.9
	BS-3/ 150 gr SEP / 60 °C	2.1



Şekil 11. Referans ve deney numunelerine ait eğilme dayanımı grafiği

SEP miktarına bağlı olarak numune içerisinde ayrılan su miktarı artış gösterdiğinden SEP oranı yüksek olan numunelerin eğilme dayanımları kontrol numunelerine göre kıyaslandığında dayanım farkı artmıştır. SEP oranı düşük olan (50 gr) BS-2/23°C/50 ve BS-2/60°C/50 numunelerinin eğilme dayanımlarının kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 11'den görüldüğü üzere BS-2/60°C/50 numunesinin eğilme dayanımı 4.1 MPa iken kontrol numunesinin eğilme dayanımı 3.6 MPa'dır. Bu durumun nedeni olarak sıcaklık etkisiyle meydana gelen çatlak miktarı SEP'in bünyesindeki suyun yavaş yavaş salınması ile sınırlandırılması olarak düşünülmektedir. Yapılan bir çalışmada SEP katkılı harçlarda suyun salınması ile çatlak oluşumunun gecikmesinden kaynaklı dayanım artışının meydana geldiği ifade edilmiştir [15].

### 3.4 Basınç dayanımı

Basınç dayanımı test sonuçları Tablo 7 ve Şekil 12'de verilmiştir. Kontrol numuneleri (MH-1,2,3) incelendiğinde sodyum konsantrasyonu ve kür sıcaklığındaki artış ile basınç dayanımı da artmıştır. Numunelerin içerdikleri SEP miktarı ile dayanım değişimine bakıldığında her üç sodyum konsantrasyonu seviyesinde (%4, %6, %8) SEP miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. SEP miktarındaki artış ile numune içindeki boşluk miktarı da arttığından dolayı basınç dayanımı da önemli ölçüde azaltmıştır. Bu azalma her iki kür sıcaklığı içinde geçerli olmuştur. Yapılan bir çalışmada, SEP içeren karışımların basınç dayanımlarının aynı yaştaki referans numunelere göre daha düşük olduğu ifade edilmiştir. Durumun nedeni SEP katkısı ile sertleştirilmiş harçlardaki makro gözeneklerin oluşumu ve boşluk miktarının artmasının sonucu olarak gösterilmiştir [15,16].

%4 sodyum konsantrasyonuna sahip numunelerin 50 gr ve 100 gr SEP içerenlerinde sıcaklıkla birlikte dayanımda azalma meydana gelmişken, 150 gr SEP içeren numunelerde tersi bir davranış gerçekleştirmiştir. 150 gr SEP içeren numunelerin yüksek kür sıcaklığında daha fazla dayanım kazanmıştır. Bu durumun nedeninin SEP bünyesinde bulunan suyun harç içerisine salınımı ile büzülme çatlaklarının önlenmesi ve mikro çatlakların sınırlandırılması ile hidrasyonun gelişimine katkı sağlanması olarak düşünülmektedir. Sodyum konsantrasyonu %6'nın üzerinde çıkarıldığında (%8) kür sıcaklığının 23 °C'den 60 °C'ye yükseltilmesi 50 gr SEP içeren numunelerde dayanıma önemli bir etki yapmamıştır. 100 gr ve 150 gr SEP oranlarında ise sıcaklık artışı ile basınç dayanımı artmıştır. BS-1/23 °C /150 gr'lik numune en düşük dayanıma (0.9 MPa) sahip iken BS-2/60 °C / 50 gr numunesinin basınç dayanımı (26.8 MPa) en yüksektir. Buna en yakın basınç dayanımı ortam sıcaklığında kür edilen BS2/23 °C /100 gr numunesidir (22.8 MPa). Bu dayanım değerleri hiç SEP içermeyen kontrol numuneleri ile kıyaslanabilir durumdadır. Birçok alanda boşluklu ve yüksek mukavemetli harçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılarda kullanım amacıyla üretilen harç ya da betonların boşluklu olması ile birlikte ağırlığında azalma meydana gelir. Hafif yapı elemanlarının kullanılması ile binanın ölü yükü azaldığından kesit küçülmesi ve donatı alanından tasarruf sağlanır [17]. Ayrıca boşluk miktarının çok olmasından dolayı ısıyı iletme kabiliyeti azalacağından termal yalıtım özelliği sayesinde enerji tasarrufu sağlamak da getiriler arasında olmaktadır [18]. Bu tür yapı elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece boşluk oranı ve basınç dayanımı yüksek harç numunelerin üretilebilir olduğu belirlenmiştir.



**Tablo 7.** Numunelerin basınç dayanımları

SEP Oran (gr)	Harç Numuneleri	Basınç Dayanımı (MPa)
0	MH-1 23 °C	15.4
	MH-1 60 °C	18.9
	MH-2 23 °C	26.6
	MH-2 60 °C	29.0
	MH-3 23 °C	30.4
	MH-3 60 °C	33.3
50	BS-1/ 50 gr SEP / 23 °C	7.5
	BS-2/ 50 gr SEP / 23 °C	22.8
	BS-3/ 50 gr SEP / 23 °C	16.3
	BS-1/ 50 gr SEP / 60 °C	3.8
	BS-2/ 50 gr SEP / 60 °C	26.8
	BS-3/ 50 gr SEP / 60 °C	17.2
100	BS-1/ 100 gr SEP / 23 °C	10.6
	BS-2/ 100 gr SEP / 23 °C	18.4
	BS-3/ 100 gr SEP / 23 °C	12.0
	BS-1/ 100 gr SEP / 60 °C	4.1
	BS-2/ 100 gr SEP / 60 °C	13.8
	BS-3/ 100 gr SEP / 60 °C	15.6
150	BS-1/ 150 gr SEP / 23 °C	0.9
	BS-2/ 150 gr SEP / 23 °C	4.8
	BS-3/ 150 gr SEP / 23 °C	13.0
	BS-1/ 150 gr SEP / 60 °C	2.1
	BS-2/ 150 gr SEP / 60 °C	6.6
	BS-3/ 150 gr SEP / 60 °C	9.9

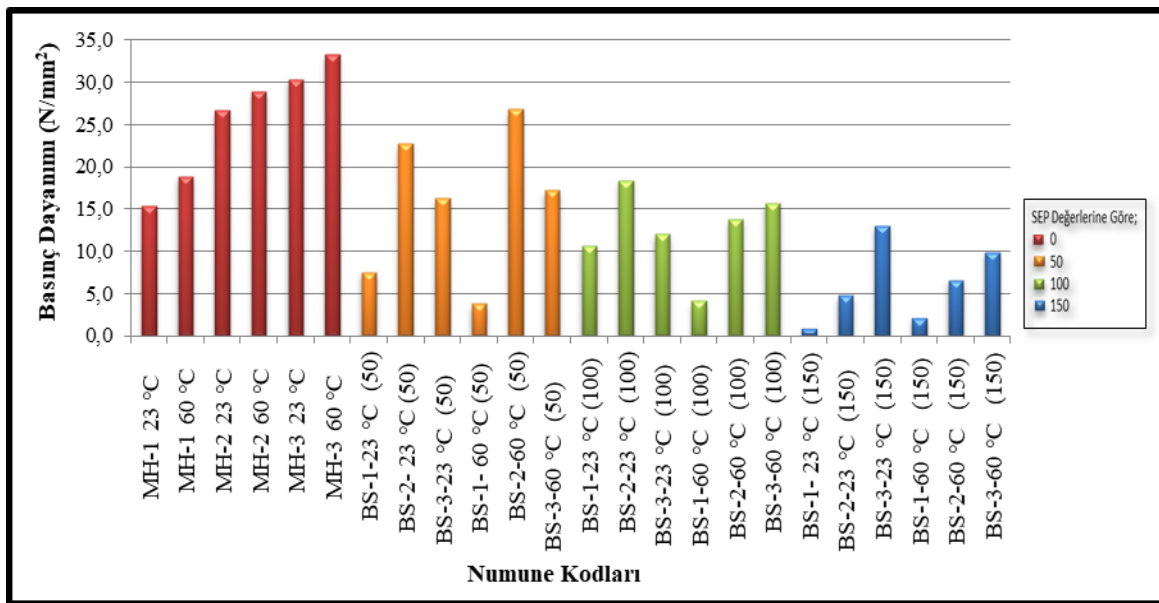
### 3.5 Eğilme-basınç dayanımı

50, 100, 150 gr SEP katkısı ile hazırlanan numunelerin kontrol numunelerine kıyasla eğilme-basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 13'deki grafikte referans numunelerinin tamamı eğilme dayanımı bakımından 2.5-4 MPa aralığında iken, basınç dayanımları 15-35 MPa aralığındadır. Tüm kontrol numunelerinde eğilme dayanımları artarken genel olarak sıcaklığa bağlı basınç dayanımları da artmıştır. Genel olarak SEP oranı arttıkça hem eğilme hem de basınç dayanımlarının azaldığı ve bunun nedeninin artan boşluk miktarı olduğu düşünülmektedir. 60 °C'lik numunelerin dayanımı oda sıcaklığındaki numunelere göre daha düşük değerlerde seyretmektedir. Sıcaklık küri sebebi ile meydana gelen çatlaklar için 50 gr SEP ilavesi ile bünyesindeki suyu karışıma salması ile önlenmiştir. Böylece hem eğilme hem de basınç dayanımı yüksek alkali aktive edilmiş YFC'li harç üretimleri yapılabilmektedir.

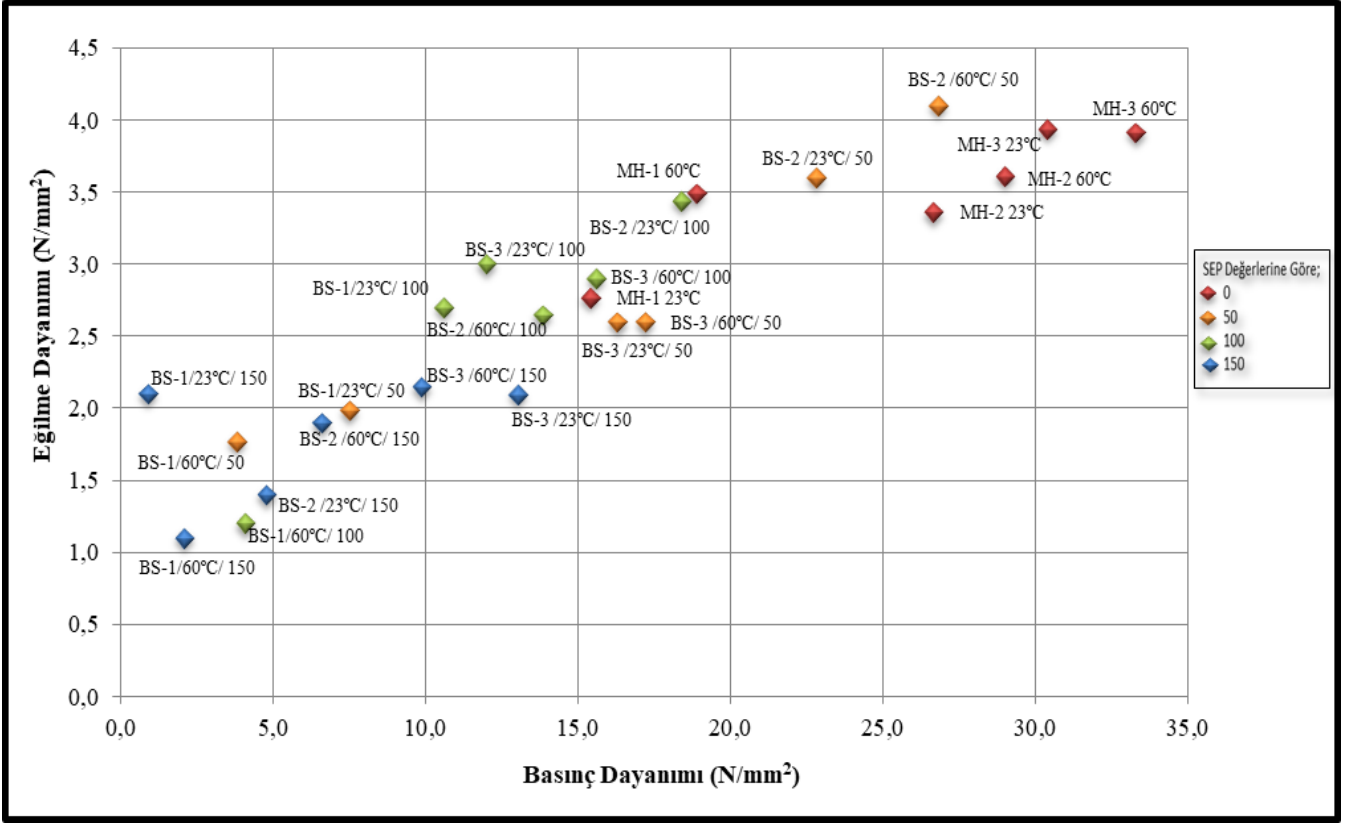
### 3.6 Su Emme-basınç dayanımı

Farklı oranlarda SEP ilavesi ile hazırlanan numunelerin su emme kapasitesi ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 14'de gösterilmiştir. Basınç dayanımı ile su emme kapasiteleri arasında ters bir ilişki bulunmaktadır. SEP oranı arttıkça numunelerin su emme kapasiteleri de artmış ancak basınç dayanımları azalmıştır. Bunun asıl nedeni polimerin harçta oluşturduğu boşluk yapısıdır. Boşlukların artmasıyla harcın basınç etkilerine karşı gösterdiği direnç azalır [19].

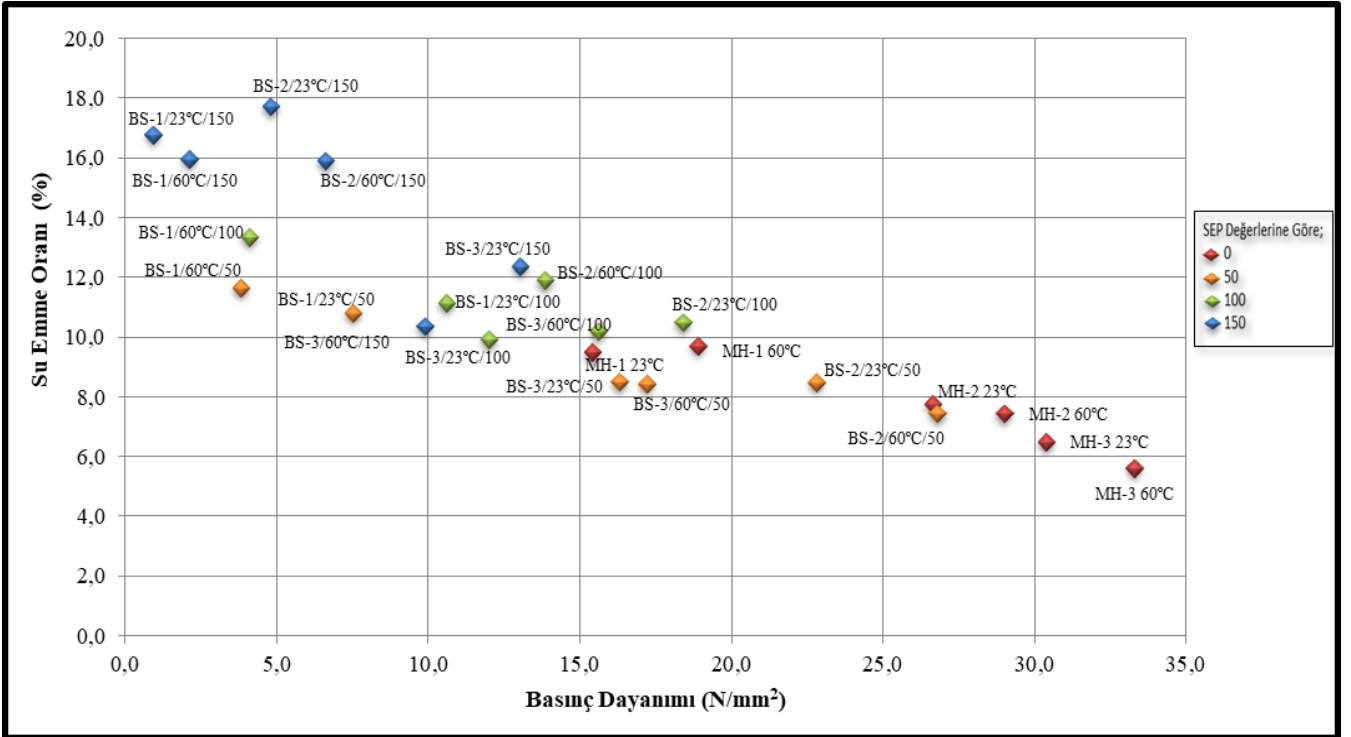
Song vd. [20] yaptığı çalışmada; SEP arttıkça içten kürlenmenin etkisinin arttığını; bununla birlikte SEP'in, numuneler içinde basınç dayanımını azaltan boşluklar yarattığını ve SEP'lerin uygun dozajını belirlemek için, numunelerin mukavemetinin artması ve azalması dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. 150 gr katkı içeren numuneler incelendiğinde, boşluk oranı arttıkça su emme oranları da artan numunelerde dayanım oldukça düşmüştür.



**Şekil 12.** Numunelerin basınç dayanımları



Şekil 13. Numunelerin eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 14. Numunelerin su emme kapasitesi ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

#### 4 Sonuçlar

Alkaliler ile aktive edilen YFC harçlarının SEP ilave edilmesi ile içten kürlenme, işlenebilirlik ve dayanım özelliklerini incelemek amacıyla yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar şöyledir:

- SEP katkısı alkalilerle aktive edilen YFC harçlarının su emme kapasitelerini arttırmış ancak alkali konsantrasyonu ve kür koşullarının uygun olduğu karışımlarda dayanımda önemli bir azalma meydana gelmemiştir.
- %4 ve %8 sodyum konsantrasyonu ile aktive edilen YFC harçlarında kontrol numunelerine oranla dayanım değerlerinin önemli derecede azaldığı ancak %6 sodyum konsantrasyonuna sahip numunelerin dayanım açısından kontrol numuneleri ile kıyaslanabilir olduğu görülmüştür.
- SEP ilave oranı arttıkça taze haldeki harcın yayılma çapı artmıştır.
- 150 gr SEP katkısı ile üretilen numunelerde gözlemlenen kuruma çatlakları önemli ölçüde azalmıştır. SEP kullanımı ile içten kürlenme etkisi gerçekleşmiştir.
- Sıcaklık kürü uygulanan numunelerde gözlenen yüzey çatlak sayısının ve çatlak boyutunun SEP ilavesi yapılan numunelerde azaldığı gözlenmiştir.
- SEP miktarının 100 gr'den fazla olması durumunda eğilme ve basınç dayanımlarında ciddi oranda azalma meydana gelmiştir. SEP miktarı 150 gr'yi aştıktan sonra segregasyon ve kismaya neden olmuştur ve daha yüksek oranlarda SEP içeren harç üretimleri yapılamamıştır.
- Dayanım ve su emme kapasitesinin her ikisinde yüksek olduğu ideal karışım şartları BS2 /50 gr 60 °C olarak belirlenmiştir.

YFC'nin alkali aktivasyonunda SEP kullanımı ile içten kürlenme sağlanarak zaman ve enerji tasarrufu yüksek, sürdürülebilir geopolimerler üretilir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %12**

#### Kaynaklar

- [1] S. Aydın, Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcı lifli kompozit geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2010.
- [2] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Demir Çelik Cüruf Raporu. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, 2015.
- [3] X. Chen, L.S. Chen, J.T. Xu, Research on sodium polyacrylate and its effects on mechanical properties of slag-based geopolymer. In Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publications Ltd., 638, 1387-1390, 2014. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.638-640.1387>
- [4] M. Al-Nasra, Concrete made for energy conservation mixed with sodium polyacrylates. International Journal

- of Engineering Research and Application, 3(5) 601-13, 2013.
- [5] M. Al-Nasra, M. Daoud, Investigating the use of super absorbent polymer in plain concrete. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3(8) 598-603, 2013.
- [6] T. Manzur, S. Iffat and M. A. Noor, Efficiency of sodium polyacrylate to improve durability of concrete under adverse curing condition, Advances in Materials Science and Engineering. Article ID 685785, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/685785>.
- [7] O. Mahmut, M. Emiroğlu, Elazığ ferrokrom cürufunun alkali aktive edilmiş harç üretiminde kullanım potansiyelinin araştırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(1), 23-34, 2016.
- [8] E. Ekinci, İ. Türkmen, Farklı aktivatör ve ham madde değişkenlerinin geopolimer hamurun basınç dayanımına etkisinin incelenmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (24), 169-175, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.903895>.
- [9] Z. He, A. Shen, Y. Guo, Z. Lyu, D. Li, X. Qin, M. Zhao and Z. Wang, Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review. Construction and Building Materials, 225, 569-590, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.139>
- [10] C. Elibol, Alkalilerle aktive edilen çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2012.
- [11] H.T. Türker, M. Balçıkanlı, İ.H. Durmuş, E. Özbay and M. Erdemir, Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level. Construction and Building Materials, 104, 169-180, 2016.
- [12] ASTM C109 Standard Test Method for Compressize Strength of Hydraulic Cement Mortar, 1993 Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 1916 Race Steet, Philadelphia, PA 19103.
- [13] TS EN 196-1. "Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım". Türk Standartları Enstitüsü, 2002.
- [14] D. Snoeck, K. Van Tittelboom, S. Steuperaert, P. Dubruel and N. De Belie, Self-healing cementitious materials by the combination of microfibrils and superabsorbent polymers. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 25(1), 13-24, 2014. <https://doi.org/10.1177/1045389X12438623>
- [15] L. De Meyst, E. Mannekens, K. Van Tittelboom, & N. De Belie, The influence of superabsorbent polymers (SAPs) on autogenous shrinkage in cement paste, mortar and concrete. Construction and Building Materials, 286, 122948, 2021.
- [16] De Cycloaddition, U. D. L. R., Guillaume TILLET (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon), 2010.
- [17] O. A. Düzgün, R. Gül, ve A.C. Aydın, Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. Materials Letters, 59:3357-3363, 2005.

- [18] N. Kabay, Hafif agregalı betonun boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 2009.
- [19] T.F Awolusi, L.O Oke, O.O Akinkulore, D.P. Ubani, R.T. Bamisaye, & O.G Aluko, The application of response surface methodology in understanding the compressive strength and water absorption capacity of sandcrete blocks. *Silicon*, 1-10,2020.
- [20] C. Song, Y.C. Choi and S. Choi, Effect of internal curing by superabsorbent polymers–internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars. *Construction and Building Materials*,123,198-206,2016.<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.007>







## Asfalt karışımların termal iletkenliklerinin değerlendirilmesi Evaluation of the thermal conductivities of asphalt mixtures

Nurgül Şirin<sup>1</sup> , Erol İskender<sup>2,\*</sup> , Atakan Aksoy<sup>3</sup> , Mustafa Taha Aslan<sup>4</sup> ,  
Cansu İskender<sup>5</sup> 

<sup>1</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon, Türkiye

<sup>3,4</sup> Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

<sup>5</sup> Avrasya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61010, Trabzon, Türkiye

### Öz

Makalede asfalt karışımların termal iletkenlikleri agrega cinsi, agrega gradasyonu, maksimum agrega boyutu, karışım türü ve yaygın kullanılan asfalt katkı maddelerine bağlı olarak araştırılmıştır. Bazalt ve kireç taşı agregası kullanılarak 19 mm ve 12.5 mm maksimum boyutlu agregalarla farklı gradasyonlarda yoğun gradasyonlu ve kesikli gradasyonlu karışım tasarımları yapılmıştır. Bazalt ve kireç taşı agregaları kullanılarak kontrol (K) bitümlü karışımlara ilave olarak kauçuk (R), selülozik elyaf (SE), Stiren-Bütadien-Stiren (SBS), Styrene Isoprene Styrene (SIS), Elvaloy (E), Stiren-Etilen-Butilen-Stiren (SEBS), poliolefin elastomer (PE) ve nanokil (NC) modifiye asfalt karışımlar üretilmiştir. Karışımların termal iletkenliklerinin agrega gradasyonundan önemli ölçüde etkilendiği, ince agrega oranının artmasının karışımın termal iletkenliğini artırdığı, yoğun gradasyonlu karışımların termal iletkenliğinin taş mastik asfaltlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Maksimum agrega boyutunun etkisi oluşturulan gradasyonlarda açık olarak anlaşılamamıştır. Kullanılan katkı maddelerinin tamamı termal iletkenliği azaltmış, en yüksek azalma SE ve R modifiye karışımlarda görülmüştür. Bazalt agregası yerine kireç taşı agregası kullanılan karışımların termal iletkenlikleri azalmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Termal iletkenlik, Selüloz elyaf, Polimer, Kauçuk, Nanokil, Agrega gradasyonu, Agrega türü, Maksimum agrega boyutu

### 1 Giriş

Asfalt karışımlar, agrega, bitüm ve katkı maddelerinden oluşan, sıkıştırıldıklarında içerisinde bir miktar hava boşluğu kalan heterojen karışımlardır. Karışımı oluşturan bileşenlerden bitümün viskoelastik ve aynı zamanda termoplastik doğasından dolayı asfalt kaplamaların mekanik özellikleri sıcaklık değişimlerinden önemli derecede etkilenmektedir. Asfalt betonunun termal özelliklerinin asfalt kaplama yapısındaki sıcaklık dağılımı üzerinde ve dolayısıyla kaplama ömrü üzerinde önemli etkisi vardır [1].

Kaplama yüzey sıcaklığı çevre ve güvenlik sorunlarıyla ilgili bir konudur. Asfalt kaplamaların yüzeyi yaz aylarında

### Abstract

In the article, thermal conductivity of asphalt mixtures was investigated depending on aggregate type, aggregate gradation, maximum aggregate size, mixture type and commonly used asphalt additives. By using basalt and limestone aggregates, dense graded and gap graded asphalt mixture designs were made with 19 mm and 12.5 mm maximum sized aggregates in different gradations. In addition to control (K) bituminous mixtures using basalt and limestone aggregates, rubber (R), cellulosic fiber (SE), Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), Styrene Isoprene Styrene (SIS), Elvaloy (E), Styrene-Ethylene- Butylene-Styrene (SEBS), polyolefin elastomer (PE) and nanoclay (NC) modified asphalt mixtures were produced. It was observed that the thermal conductivity of the mixtures was significantly affected by the aggregate gradation, the increase in the fine aggregate ratio increased the thermal conductivity of the mixture, and the thermal conductivity of the dense graded mixtures was higher than the stone mastic asphalts. The effect of maximum aggregate size was not clearly understood in the gradations created. All of the additives used decreased the thermal conductivity, and the highest decrease was observed in SE and R modified mixtures. The thermal conductivity of the mixtures using limestone aggregate instead of basalt aggregate decreased.

**Keywords:** Thermal conductivity, Cellulose fiber, Polymer, Rubber, Nanoclay, Aggregate gradation, Aggregate type, Maximum aggregate size

70 °C' ye kadar ısınabilir ve bu da kentsel ısı adası etkisine neden olur. Kaplama, ısıyı depolar ve onu çevreleyen ortama geri yayar, bu da düşük hava kalitesi sorunlarına ve binaları soğutmak için ek enerji kullanımına yol açar [2]. Öte yandan, kış aylarında, kaplama yüzeyi donma sıcaklığının altına düştüğünde buzlu yollar kritik bir güvenlik sorunudur.

Ortamin günlük sıcaklık değişimi ve asfalt kaplama tabakasının derinliği boyunca buna karşılık gelen sıcaklık gradyanı, soğuk iklimde üst yapı çatlamasının ana kaynaklarından biri olan termal gerilmeye neden olur [3].

Yaz ve kış aylarında aşırı sıcaklık değişiklikleri olabilmektedir. Yüksek hava sıcaklıklarında, sıcaklık

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: : eiskender@ktu.edu.tr (E. İskender)

Geliş / Received: 28.12.2021 Kabul / Accepted: 07.02.2021 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1049283

kaplama yüzeyinden alt tabakalara doğru, düşük sıcaklıklarda da alt tabakalardan üst tabakalara doğru iletilmektedir. Üst tabakalarla alt tabakalar arasındaki sıcaklık farkları çok büyük olduğunda farklı genleşme miktarlarından kaynaklanan ek gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler termal çatlamalara yol açarak kaplamanın ömrünü azaltabilmektedir [4].

Kaplamanın maksimum sıcaklığını düşürmek ve karlanma - buzlanmanın sebep olduğu olumsuzlukları önlemek amacıyla çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Karlanma ve buzlanma ile mücadelede küreme, tuzlama, kimyasal madde uygulamaları vb. geleneksel yöntemlerin zamanla kaplamaya zarar verme potansiyeli ve aynı zamanda ekonomik olmamaları son yıllarda iletken asfalt betonu ve elektrikli ısıtma kabloları kullanımı, akışkan ısıtma yöntemi, kızılötesi ısıtma yöntemleri gibi termal yöntemleri ön plana çıkarmıştır [5].

Kaplama sıcaklığını düzenlemenin çevre dostu ve ekonomik yollarından biri de kaplama malzemelerinin termal özelliklerini kontrol etmektir [6]. Literatürde, sıkıştırılmış asfalt kaplamaların termal iletkenliğinin karışım tasarımına göre 0.75-1.73 W/mK aralığında değiştiği ve termal iletkenliğin kaplamaların sıcaklık dağılımını değiştirebileceği belirtilmiştir [7].

Asfalt kaplamanın termal iletkenlik ve ısı kapasitesinin artmasıyla günlük maksimum kaplama yüzeyi sıcaklığının düştüğü ve günlük minimum sıcaklığın arttığı bu nedenle hem olumlu (günlük maksimum sıcaklığı düşürür) hem de olumsuz (günlük minimum sıcaklığı artırır) etkisi olduğu ifade edilmiştir [1].

Kireçtaşı, kuvarsit (yüksek iletken), bakır lifi, bakır çürufu ve Lytag (az iletken, yakıt külü agregası) kullanılarak üretilmiş asfalt karışımların termal özellikleri araştırılmış, kireçtaşı agregasının tamamının kuvarsit ile değiştirilmesinin karışımın ısı iletkenliğini ve ısı kapasitesini sırasıyla %104 ve %122 artırdığı görülmüştür. Üstelik kuvarsitin asfalt karışımın maksimum yüzey sıcaklığını 4 °C'ye kadar düşürdüğü ve tekerlek izini azalttığı sonucuna varılmıştır [8].

Öte yandan, soğuk iklimli bölgelerde hafif agregalarla üretilen düşük ısı iletkenlikli asfalt kaplamaların don penetrasyon derinliğinin azalacağı ifade edilmektedir [9].

Bitümlü karışımların ısı iletkenliğini incelemek amacıyla yapılan bir araştırmada klorit ve bazalt agregaları

kullanılarak farklı gradasyonlar üzerinde çalışılmıştır. Bitümlü karışımların termal iletkenliğinin, agreganın mineral yapısına ve hava boşluğu miktarına bağlı olduğu, termal iletkenliğin agrega boyutundan çok az etkilendiği ve bitümlü bağlayıcının agregalar arasında termal köprü oluşturduğu görülmüştür [10].

Literatürde genel olarak iletkenlik artırıcı özelliği bulunan katkı maddeleriyle üretilen asfalt karışımların termal iletkenlikleri araştırılmıştır [8, 10-15]. Fakat literatürde, genel performans artırıcı katkı maddelerinin iletkenlik özelliklerini değerlendiren çalışmaların eksikliği göze çarpmaktadır. Bu çalışmanın amacı, asfalt karışımların termal iletkenliklerinin agrega gradasyonu, maksimum agrega boyutu, asfalt katkı maddesi türü ve agrega türüne bağlı olarak değerlendirilmesidir. Bu amaçla; kireç taşı ve bazalt agregaları kullanılarak, Taş Mastik Asfalt (Tip-1A ve Tip-2) ve asfalt betonu (Tip-1, Tip-2 ve Tip-3) aşınma tabakası tasarımları yapılmıştır. Kauçuk (R), selülozik elyaf (SE), stiren bütadiyen stiren (SBS), stiren isopren stiren (SIS), elvaloy (E), stiren etilen butilen stiren (SEBS), poliolefin elastomer (PE) ve nanokil (NC) modifiyer türleri kullanılarak asfalt karışımlar üretilmiştir. Hazırlanan asfalt karışımların, termal iletkenlik katsayıları ölçülmek suretiyle termal iletkenlikleri değerlendirilmiştir.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan asfalt çimentosu Tüpraş Kırıkkale tesislerinden temin edilmiştir. Kullanılan asfalt bağlayıcının temel mühendislik özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Bitümlü bağlayıcı özellikleri

	Yöntem	Değer	Şartname Limitleri
Özgül ağırlık (25°C)	ASTM-70	1.025	
Yumuşama noktası (°C)	TS EN 1427	52	46-54
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2592	240	En az 230
Penetrasyon (25°C)	TS EN 1426	63	50-70
Düktilite (25°C)	TS EN D-113	100+	

**Tablo 2.** Bazalt ve kireçtaşı agregalarının temel fiziksel özellikleri

Malzeme Özelliği	Dency Standardı	Bazalt Agregası	Kireç Taşı Agregası
Filler zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )		2.821	2.793
İnce agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C128	2.656	2.638
İnce agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )		2.754	2.711
İnce agrega su emme (%)	TS EN 1097- 6	0.81	1.10
Kaba agrega hacim özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127	2.684	2.647
Kaba agrega zahiri özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	ASTM C127	2.744	2.699
Kaba agrega parçalanma direnci (Los Angeles kayıp) (%)	TS EN 1097-2	12	26.7
Kaba agrega yassılık indeksi (%)	BS 812	14	9.71
Kaba agrega su emme (%)	TS EN 1097-6	0.81	1.03
Kaba agrega donma kaybı (NaSO <sub>4</sub> ile kayıp) (%)	ASTM C-88	0.92	1.45

**Tablo 3.** Çalışmada kullanılan agrega gradasyonları

Elek boyutu (mm)	TMA Tip-1A kaba	TMA Tip-1A ince	TMA Tip-2	Yoğun gradasyon Tip-1	Yoğun gradasyon Tip-2	Yoğun gradasyon Tip-3
19.0	100	100	-	100	-	-
12.5	98	92	100	96	100	100
9.5	55	70	95	81	90	95
4.75	30	35	35	47	63	29
2.0	22	28	25	30	45	27
0.425	14	20	17	15	22	23
0.18	12	15	13	10	12	15
0.075	9	11	10	5	6	9
İnce agrega oranı (%)	21	24	25	42	57	19
Kaba agrega oranı (%)	70	65	65	53	37	71

Araştırmada bazalt ve kireç taşı olmak üzere iki farklı agrega türü kullanılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri **Tablo 2**'de sunulmuştur.

Karayolları Teknik Şartnamesine [16] göre Taş Mastik Asfalt (Tip-1 A ve Tip-2) ve yoğun gradasyonlu asfalt betonu (Tip-1, Tip-2 ve Tip-3) aşınma tabakası gradasyonları seçilmiştir. Seçilen agrega gradasyonları **Tablo 3**'te verilmiştir.

Asfalt karışım üretiminde kontrol bitüm (K) ve modifiye bitümler kullanılmıştır. Kauçuk (R), selülozik elyaf (SE), (Kraton D1192 ESM) (SBS – K), stiren bütadiyen stiren (Europrene SOL T 6302) (SBS – E), stiren isopren stiren (SIS), elvaloy (E), stiren etilen butilen stiren (SEBS), poliolefin elastomer (PE) ve nanokil (NC) olmak üzere dokuz farklı modifiyer kullanılmıştır. Kullanılan modifiyerlerden bir görüntü **Şekil 1**'de gösterilmiştir. Kauçuk katkısı hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda performansının iyi olması ve ısısını uzun süre muhafaza

edebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir [17]. Bu çalışmada %15 oranında kullanılan kauçuk partikül boyutları 0.6 mm ile 2.5 mm arasındadır. Selülozik elyaf çatlama direncini artırma, karışımda bulunan bitümün süzülmesini engelleme ve mekanik stabiliteyi artırma gibi avantajlara sahiptir [18]. Selülozik elyafın ısı dayanımı 250 °C'ye kadar çıkabilmektedir. Selülozik elyaflar yüksek ısı dayanımına sahip olup ısı yalıtımı sağlamak amacıyla kullanılabilirler. Selülozik elyafın ısı iletkenliği büyük oranda malzemenin yoğunluğuna bağlıdır [19]. Bu çalışmada toplam agrega ağırlığına göre %0.3 oranında Viatop Premium marka selülozik elyaf kullanılmıştır.

SBS katkısı sadece karışımın değil aynı zamanda bitümlü bağlayıcının da davranışlarını iyileştiren bir katkı maddesidir. SBS katkı maddesi tekerlek izi, soyulma, ondülasyon ve düşük sıcaklık çatlakları gibi bozulmaların önlenmesi için kullanılabilir.



**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan katkı maddeleri

SBS bitüme katıldığında hacmi 10 kat artarak üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturur. Karışımın yüksek sıcaklıkta kıvama artarken düşük sıcaklıkta kırılabilirliği azalır [20]. Bitümlü bağlayıcıdaki SBS oranının artmasıyla bitümlü bağlayıcıların ısıya karşı duyarlılığı azalmaktadır [21]. Bu çalışmada SBS katkı maddeleri literatürde önerilen %5 oranında kullanılmıştır.

SIS katkısı büyük hacimli termoplastik bir elastomerdır. SIS katkısı eklendiği karışımlarda viskoziteyi artırır ve tekerlek izi oluşumu üzerinde olumlu etkilere sahiptir. Karışımında SIS içeriği arttıkça bağlayıcının çatlama direnci de artmaktadır [22]. Bu çalışmada SIS 1126 katkı maddesi bitümün ağırlıkça %5'i oranında kullanılmıştır.

E katkısı karışım ve asfalt bağlayıcının modifikasyonunda kullanılan elastomerik terpolimerdir. Elvaloy modifikasyonu bitümün viskozitesini ve yumuşama noktasını artırırken düktilitesini ve penetrasyonunu azaltır. Asfalt karışımların tekerlek izi ve su hasarı direncini artırır. Bu polimer yüksek erime noktasına sahip olup eklendiği malzemelere termal dayanım sağlamaktadır [23]. Bu çalışmada %5 oranında DuPont, Elvaloy RET kullanılmıştır.

SEBS katkısı önemli bir termoplastik elastomer olup SBS'nin basit hidrojenasyonu ile elde edilir. Yapısındaki çift bağ sayesinde SBS'den daha rijit bir yapıya sahiptir böylece ısı ve hava koşullarına karşı dayanıklılık sağlar [24]. Bu çalışmada %5 oranında SEBS elastomeri KRATON G1652 E kullanılmıştır.

PE, karbon zincirlerinin birleşmesinden oluşan ve polimerlerin bir sınıfı olan termoplastik elastomerdır. Katkı maddesi olarak kullanıldığında bitümün penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite özelliklerini geliştirdiği saptanmıştır [25]. Bu çalışmada %5 oranında Lucolast 7010 Lucobit poliolefin elastomeri kullanılmıştır.

NC, asfalt bağlayıcıların modifikasyonunda kullanılan ucuz ve ham maddesi doğal olarak bulunan sürdürülebilir özellikli katkı malzemesidir. NC, kullanıldığı asfalt kaplamalara dayanıklılık sağlar ayrıca mekanik ve fonksiyonel özelliklerini stabilize eder [26]. NC katkısı bu çalışmada %5 oranında kullanılmıştır.

## 2.2 Asfalt karışımının tasarımı

Taş mastik asfalt (TMA) ve yoğun gradasyonlu asfalt betonu (GAB) karışım tasarımları ASTM 1559 standardına göre, Marshall yöntemiyle yapılmıştır. Asfalt karışım tasarımı kontrol bitüm ve bazalt agregası ile yapılmıştır. Hem yoğun gradasyon hem de kesikli gradasyon seçenekleri için optimum bitüm içerikleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Optimum bitüm içeriği üzerinde polimer tipi, agrega gradasyonundan daha düşük etki oluşturduğundan yalnızca gradasyonlar için karışım tasarımları yapılmıştır. Bulunan optimum bitüm içerikleri kireçtaşı agregası ve modifiye bitümler için de kullanılmıştır. Agrega gradasyonlarına göre belirlenen bitüm içerikleri **Tablo 4**'te gösterilmiştir.

## 2.3 Asfalt karışımların termal iletkenliklerinin belirlenmesi

Asfalt numunelerinin termal iletkenlik katsayısının ölçümünde **Şekil 2**'de gösterilen termal özellik analiz cihazı (Decagon KD2 Pro Thermal Properties Analyzer)

kullanılmıştır. KD2 Pro cihazı taşınabilir bir termal özellik analizörüdür.

**Tablo 4.** Optimum bitüm içeriği değerleri

Karışım türü	Optimum bitüm içeriği (%)
TMA Tip-1A Kaba	6.43
TMA Tip-1A İnce	6.68
TMA Tip-2	7.16
GAB Tip-1	5.1
GAB Tip-2	5.65
GAB Tip-3	6.23

Bu cihaz termal iletkenliği, termal direnci, özgül ısıyı (ısı kapasitesi) ve ısı yayılmayı ASTM D5334-08 ve IEEE 442-1981 standartlarına uygun olarak ölçen üç adet sensöre sahip olup ısıtılmalı iğne teknolojisi ile birlikte kalibrasyon gerektirmeden ölçüm yapabilmektedir. Menü odaklı olan bu cihazın iki elemanı bulunmaktadır. İlk elemanı kontrol modülüdür, bu modül 16 bit mikro denetleyici ve üç kontrol devresinden oluşmaktadır. Diğer eleman ise ısıtma elemanı ve termistörden oluşan, ölçümün yapılacağı maddenin cinsine bağlı olarak değişebilen cihaz iğnesidir. Bu çalışmada TR-1 kodlu cihaz iğnesi kullanılmıştır. TR-1 iğnesi 24 mm çapında, 10 cm uzunluğunda paslanmaz çelikten üretilmiştir. Bu iğne -50°C ila 150°C arasında ölçüm yapabilmekte ayrıca 0.1 W/mK ila 4 W/mK arasındaki termal iletkenlik katsayısını ölçebilmektedir. Gerçekleştirilen her ölçüm toplam 90 saniye sürmektedir. Ölçümün ilk 30 saniyesinde cihaz iğnesinin sıcaklığı ölçüm yapılacak numunenin sıcaklığına eşitleninceye kadar ısınır, sonraki 30 saniye boyunca cihaz iğnesi numuneye sıcaklık uygular son 30 saniyede ise cihaz iğnesi numuneye ısı uygulamayı sonlandırarak soğuma işleminin bitmesini bekler. Cihaz iğnesi sıcaklık değerlerini ölçüm boyunca okuyarak verileri kontrol modülüne iletir, kontrol modülü **Denklemler (1)**'i kullanarak numunenin termal iletkenlik katsayısını hesaplar.

$$k = q(\ln t_2 - \ln t_1) / 4\pi(\Delta T_1 - \Delta T_2) \quad (1)$$

Burada q cihaz iğnesinin uyguladığı sabit ısı akısını,  $\Delta T_1$  ve  $\Delta T_2$  ise  $t_1$  ve  $t_2$  anlarındaki sıcaklık farkını belirtmektedir.

Termal iletkenlik katsayısının ölçümünün gerçekleştirilmesi amacıyla asfalt karışım örnekleri uygun bir kaba konulmuş ardından cihaz iğnesi numunenin içerisine yerleştirilmiştir. Ölçümler gerçekleşirken numune kabının ve cihaz iğnesinin sabit ve titreşimsiz bir ortamda bulunmasına önem gösterilmiştir. Her numune için iki ayrı noktadan ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Oluşturulan asfalt karışımların termal iletkenlik katsayısının ölçümü **Şekil 3**'te gösterilmiştir.





Şekil 2. Termal özellik analiz cihazı [27].



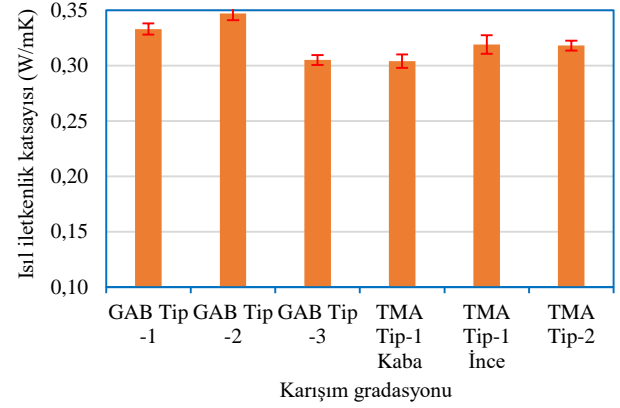
Şekil 3. Asfalt karışım örneklerinin termal iletkenliğinin ölçülmesi

### 3 Bulgular ve tartışma

Farklı gradasyonlarda bazalt ve kireçtaşı agregaları ile üretilen kontrol ve modifiye karışımların termal iletkenlik katsayıları ikişer örnek üzerinde ikişer tekrar ile ölçülmüş, sonuçların ortalaması alınarak değerlendirme yapılmıştır. Kireç taşı ve bazalt agregaları kullanılarak, Taş Mastik Asfalt (Tip-1A ve Tip-2) ve yoğun gradasyonlu asfalt betonu (Tip-1, Tip-2 ve Tip-3) aşınma tabakası tasarımları yapılmıştır. Asfalt karışım üretiminde kontrol bitüm (K) ile

kauçuk (R), selülozik elyaf (SE), (Kraton D1192 ESM) (SBS – K), stiren bütadiyen stiren (Europrene SOL T 6302) (SBS – E), stiren isopren stiren (SIS), elvaloy (E), stiren etilen butilen stiren (SEBS), poliolefin elastomer (PE) ve nanokil (NC) modifiye bitümler kullanılmıştır.

Şekil 4’te kontrol bitüm ve bazalt agregası kullanılarak hazırlanan geleneksel asfalt betonu ve taş mastik asfalt karışımların termal iletkenlik katsayıları karşılaştırılmıştır. Tablo 5’te de karışımların maksimum agrega boyutları, kaba agrega, ince agrega ve filler oranlarının değişimi ile iletkenlik katsayılarının değişimi özetlenmiştir.



Şekil 4. Karışım türüne bağlı olarak termal iletkenlik katsayılarının değişimi

Maksimum agrega boyutu 19 mm olan karışımlarda yoğun gradasyonlu karışımın termal iletkenlik katsayısı (k) taş mastik asfalt karışımlara göre daha yüksek çıkmıştır. Maksimum agrega boyutu aynı olan karışımlar içerisinde (TMA Tip-1A kaba ve TMA Tip-1A ince) ince agrega oranı fazla olan karışımların k değerleri daha yüksek belirlenmiştir. Aynı eğilim GAB karışımlarda da görülmüştür. Maksimum agrega boyutu 12.5 mm olan karışımlardan, ince agrega oranı %57 olan GAB Tip-2’nin k katsayısı ince agrega oranı %19 olan GAB Tip-3 karışımların k katsayısından daha yüksek çıkmıştır. Kesikli gradasyonlar ve yoğun gradasyonlarda hazırlanan karışımlar ayrı ayrı değerlendirildiğinde, maksimum agrega boyutunun 19 mm’den 12.5 mm’ye düşürülmesinin termal iletkenlik katsayısı üzerindeki etkisi net olarak görülemez.

Tablo 5. Maksimum agrega boyutu ve fraksiyon oranlarına göre ısı iletkenlik katsayıları

Elek boyutu (mm)	TMA Tip-1A kaba	TMA Tip-1A ince	TMA Tip-2	GAB Tip-1	GAB Tip-2	GAB Tip-3
Maksimum agrega boyutu (mm)	19.0	19.0	12.5	19.0	12.5	12.5
Kaba agrega oranı (%)	70	65	65	53	37	71
İnce agrega oranı (%)	21	24	25	42	57	19
Filler oranı (%)	9	11	10	5	6	9
Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)	0.304	0.319	0.318	0.333	0.347	0.305

Sıkıştırılmış asfalt kaplamaların termal iletkenlikleri 0.75-1.73 W/mK aralığında değişmektedir [7]. Bu çalışmada gevşek asfalt karışımların termal iletkenlikleri değerlendirilmiş, k değerlerinin 0.3 W/mK değerinden başladığı görülmüştür. Termal iletkenliğin, hava boşluğu oranının artması ile azaldığı ifade edilmektedir. Kaba agreganın artması, agregalar arası boşluğu dolduracak yeterli miktarda ince agreganın, filler-bitüm bulunmadığı durumda boşluk oranının artmasından dolayı termal iletkenliği azaltması beklenir. Agregaların, bitümün ve hava boşluklarının ortalama ısıl iletkenlik katsayıları literatürde sırasıyla 0.75, 2.855 ve 0.025 W/mK olarak verilmektedir. Hava boşluğu oranının artması, boşlukların düşük ısıl iletkenliklerinden dolayı, asfalt karışımının ısıl iletkenliğini düşürmektedir [28].

Literatürde yer alan bir çalışmada, ince agreganın artmasıyla, ince agregaların termal iletkenliğinin kaba agregalara göre daha yüksek olması ve ince agregaların karışımı daha homojen hale getirmesinden dolayı termal iletkenlikte az da olsa artış meydana geldiği gözlemlenmiştir [29]. Hava boşluğunun asfalt karışımların termal iletkenliği üzerine olan etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada da hava boşluğu içeriğinin artmasının asfalt karışımların ısıl iletkenliğini düşürdüğü belirlenmiştir [30]. Bu çalışmada bulunan sonuçlar bu anlamda literatürle uyumlu görülmektedir.

Şekil 5'te bazalt agregası ve kireçtaşı agregası ile üretilen kontrol ve modifiye GAB Tip-1 asfalt karışımların termal iletkenlik katsayıları verilmiştir. Şekil 5'ten görüldüğü üzere, bazalt agregası kullanılarak oluşturulan karışımların termal iletkenlik katsayıları kireç taşı agregası kullanılarak oluşturulan karışımlara göre daha yüksektir.

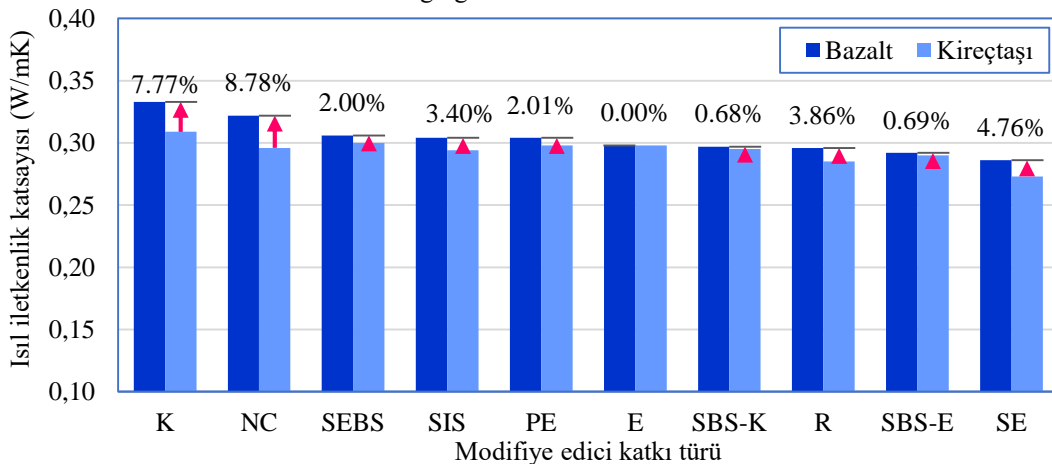
Agrega türü asfalt kaplamaların termal iletkenliğini önemli derecede etkilemektedir [31]. Kireçtaşı ve bazalt agregalarının termal iletkenlik katsayıları literatürde sırasıyla 1.75 W/mK ve 2.3 W/mK olarak ölçülmüştür [32]. Bazalt agregalarının yüksek ısıl iletkenlikleri, kireç taşı agregaları ile hazırlanan asfalt karışımlara göre, asfalt karışımının iletkenliğini de artırır.

Asfalt karışımlara polimer, nanokil veya kauçuk gibi katkı maddeleri eklenmesi asfalt karışımının termal iletkenliğini azaltmaktadır. Bu azalma hem bazalt agregası

hem de kireçtaşı agregası için açık olarak görülebilmektedir. Her iki agreganın türünde de en düşük termal iletkenlik katsayısı, bazalt agregası kullanılarak oluşturulan modifiye asfalt karışımlarında 0.286 W/mK; kireç taşı agregası kullanılarak oluşturulan modifiye asfalt karışımlarında 0.273 W/mK olmak üzere selülozik elyaf modifiyeli karışımlarda görülmüştür. Bunun nedeninin selülozik elyafın asfalt karışımındaki fazla bitümü absorbe edebilme böylelikle agregalar etrafında daha kalın bitüm filmi oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Polimerler düzenli kristal yapılardan ve rastgele amorf yapılardan oluşmaktadır [33]. Amorf yapıların baskın olması polimerlerin titreşim hareketini azaltmakta bu durum düşük ısıl iletkenliğe neden olmaktadır [34]. Polimerler zincirlerinde meydana gelen atom hareketleri nedeniyle ısıyı iyi absorbe edebilmektedirler. Polimerler fazla miktarda ısı absorpsiyonu yapabilmelerinden dolayı ısıyı iyi iletmemekte bunun sonucunda eklendiği karışımın termal iletkenliğini düşürmektedir [35]. Bu nedenle polimerler, karışımların termal iletkenliğini düşürmektedirler.

Polipropilen nano kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinin incelendiği bir çalışmada, nanokil varlığının nanokompozit malzemelerin termal kararlılığını arttırdığını fakat diğer termal özellikler üzerinde etkisinin oldukça küçük olduğu tespit edilmiştir [36]. Bu duruma paralel olarak bazalt agregalı karışımlarda kontrol numunesine en yakın k değerlerini NC modifiye asfalt karışımlar göstermiştir. Kireç taşı agregası kullanılarak oluşturulan karışımlarda ise kontrol numunesine en yakın değeri SEBS modifiye bitümlü karışım vermiştir.

Asfalt kaplamalar güneş ışığını iyi bir şekilde yansıtamadıklarından dolayı özellikle yaz aylarında fazlaca ısınmakta ve kentsel ısı adası oluşumunu hızlandırmaktadır. Kış aylarında ise düşük hava sıcaklıklarından ötürü kaplama yüzeyinde kar ve buzlanma meydana gelmektedir. Asfalt kaplamaların mekanik özellikleri de bu sıcaklık değişimlerine bağlı olarak değişmekte ve zamanla kaplamada bozulmalar oluşabilmektedir. Diğer yandan gevşek karışımların kamyonlar ile taşınması sırasında, yüzeyde kalan asfalt karışımının rüzgâr etkisiyle hızlı bir şekilde soğuması, karışımında termal segregasyonlara neden olmaktadır.



Şekil 5. Termal iletkenlik katsayısının kullanılan agreganın cinsine göre değişimi

Üstelik hızlı soğuyan karışımların sıkıştırılmasında sorunlar yaşanabilmektedir. Isıl iletkenliği daha yüksek olan karışımların soğuma hızı daha yüksek olacaktır. Bu nedenle daha düşük termal iletkenliğin bu anlamda olumlu sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

#### 4 Sonuçlar

Çalışmada, bazalt ve kireçtaşı agregaları ile hazırlanan asfalt karışımların termal iletkenlikleri maksimum agrega boyutu, agrega gradasyonu ve modifiyer tipine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Nanokil, kauçuk ve değişik polimerlerden oluşan dokuz farklı modifiye karışım üretilmiş, gevşek karışımların termal iletkenlik katsayıları ölçülmek suretiyle değerlendirilmiştir.

Kaba agrega oranının azalması ve ince agrega oranlarının artmasıyla asfalt karışımların termal iletkenlik katsayılarının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak karışımdaki kaba agrega oranının artmasıyla termal iletkenliği daha düşük olan boşluk oranının artmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Termal iletkenlik katsayısı agrega gradasyonundan önemli ölçüde etkilenmektedir. Yoğun gradasyonlu karışımların termal iletkenlikleri kesikli gradasyonlulara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun nedeni, yoğun gradasyonlu agregaların yüksek ince agrega, düşük kaba agrega içermesiyle daha yoğun bir karışım oluşması olarak düşünülmektedir.

SBS, SIS, E, SEBS, PE, R, SE ve NC katkıları ile modifiye edilen asfalt karışımlarının termal iletkenlikleri kontrol karışımlara göre daha düşük çıkmıştır.

Bazalt agregalarıyla üretilen asfalt karışımların termal iletkenlikleri kireç taşı ile üretilenlere göre daha yüksek çıkmıştır. Ancak, karışımlardaki maksimum agrega boyutunun termal iletkenlik üzerindeki etkisi net olarak anlaşılamamıştır. Bununla birlikte agrega gradasyonu termal iletkenlik üzerinde daha etkili bir parametre olarak ortaya çıkmıştır.

En düşük termal iletkenlik katsayıları selüloz elyaf katkıli karışımlarda görülmüştür. Selüloz elyafın bitümü emerek agregalar arasında daha kalın film oluşturması muhtemel neden olarak değerlendirilmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %19**

#### Kaynaklar

- [1] J. Gui, P. E. Phelan, K. E. Kaloush, J. S. Golden, Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(8), 683-690, 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)08991561\(2007\)19:8\(683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)08991561(2007)19:8(683))
- [2] R. B. Mallick, S. Chen. Bhowmick, Harvesting energy from asphalt pavements and reducing the heat island effect. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2(3), 214-228, 2009. <https://doi.org/10.1080/19397030903121950>
- [3] X. Shi, Y. Rew, E. Ivers, Chang-Seon Shon, E. M. Stenger, P. Park, Effects of thermally modified asphalt

- concrete on pavement temperature. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(6), 669-681, 2017. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326234>
- [4] A. Demez, Pirofillit agrega kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı betonların yangın dayanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [5] M. Chen, S. Wu, H. Wang, J. Zhang, Study of ice and snow melting process on conductive asphalt solar collector. *Solar Energy materials and Solar Cells*, 95(12), 3241-3250, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.013>.
- [6] X. Shi, Controlling thermal properties of asphalt concrete and its multifunctional applications. Dissertation. Master Thesis, A.M. University, Texas, 2014.
- [7] TM 5-852-6/AFM, 88-19. Arctic and subarctic construction calculation methods for determination of depths of freeze and thaw in soils, 1966.
- [8] A. R. Dawson, P. K. Dehdezi, M. R. Hall, J. Wang, R. Isola, Enhancing thermal properties of asphalt materials for heat storage and transfer applications. *Road Materials and Pavement Design*, 13(4), 784-803, 2012. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.735791>
- [9] A. Khan, D. Mrawira, Influence of selected mix design factors on the thermal behavior of lightweight aggregate asphalt mixes, *Journal of Testing and Evaluation* 36(6), 2008. <https://doi.org/10.1520/JTE101687>
- [10] J. Côté, V. Grosjean, Jean-Marie Konrad, Thermal conductivity of bitumen concrete. *Canadian of Civil Engineering*, 40(2), 172-180, 2013. <https://doi.org/10.1139/cjce-2012-0159>
- [11] M. R. Islam, R. A. Tarefder, Determining thermal properties of asphalt concrete using field data and laboratory testing. *Construction and Building Materials*, 67(B), 297-306, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.040>
- [12] X. Zhou, S. Wang, C. Zhou, Thermal conduction and insulation modification in asphalt-based composites. *Journal of Materials Science and Technology*, 28(3), 285-288, 2012. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(12\)60055-3](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(12)60055-3)
- [13] P. Pan, S. Wu, Y. Xiao, P. Wang, X. Liu, Influence of graphite on the thermal characteristics and anti-ageing properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 68, 220-226, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.069>
- [14] H. V. Vo, P. W. Park, W.J. Seo, J. S. Im, Effect of conductive filler size and type on thermal properties of asphalt mixtures. *Innovative Materials and Design for sustainable transportation infrastructure*, Fairbanks, Alaska. <https://doi.org/10.1061/9780784479278.001>
- [15] A. Arabzadeh, A. Sassani, H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, P.C. Taylor, Comparison between cement paste and asphalt mastic modified by carbonaceous materials: electrical and thermal properties. *Construction and Building Materials*, 213,

- 121-130, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.060>
- [16] Karayolu Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2013.
- [17] A. Sağlık, KGM Kauçuk Asfalt Çalışmaları, Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma-Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şube Müdürlüğü, Türkiye, 2011.
- [18] E. Çelikten, Taş mastik asfalt yapımında mineral filler olarak mermer tozunun kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [19] P. Vrzyski, P. Kosinski, A. Skoratko, W. Motacki, Thermal properties of cellulose fiber as insulation material in a loose state. AIP Conference Proceedings, 2133(1), 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5120136>
- [20] O. Özay ve E.A.Öztürk, Modifiye edilmiş poroz asfalt karışımların performansı. 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 28(3), 577-586, 2013, Ankara, Türkiye.
- [21] P. Ahmedzade, M. Yılmaz, Stiren-Butadien-Stiren modifikasyonunun bitümlü bağlayıcıların ısı duyarlılığı, rijitlik ve yaşlanma özellikleri üzerindeki etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11(3), 232-238, 2009. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.06022>
- [22] M. Mazumder, S. J. Lee, M. S. Lee, Properties of Styrene-Isoprene-Styrene (SIS) modified asphalt binder. Proceedings of the 9th international conference on maintenance and rehabilitation of pavements, Lecture Notes in Civil Engineering, 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-48679-2\\_56](https://doi.org/10.1007/978-3-030-48679-2_56)
- [23] T. Geçkil, Physical, Chemical, Microstructural and rheological properties of reactive terpolymer-modified bitumen. materials (Basel). 20;12(6), 921, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12060921>.
- [24] M. Yılmaz, B. V. Kök, N. Kuloğlu, T. Alataş, Elastomer türü polimerler ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcıların depolama stabiliteilerinin ve reolojik özelliklerinin incelenmesi. DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 15(1), 66-77, 2013.
- [25] S. B. Ertekin, Polyolefin Katkıların Asfaltların Kıvamı ve Yumuşama Noktasına Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2003.
- [26] Z. Hossain, M. Zaman, T. Hawa, M.C. Saha, Evaluation of moisture susceptibility of nanoclay-modified asphalt binders through the surface science approach. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(10), 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.19435533.0001228](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.19435533.0001228)
- [27] ICT International, Armidale, NSW, 2350. <http://ictinternational.com/products/kd2-pro/decagon-kd2-pro/>, Accessed 27 December 2021.
- [28] J. Chen, H. Wang, L. Li, Conductivity of asphalt concrete with random aggregate microstructure. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(12), 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001313](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001313)
- [29] K. H. Kim, S. E. Jeon, J. K. Kim, S. Yang, An experimental study on thermal conductivity of concrete. Cement and Concrete Research, 33(3), 363-371, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00965-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00965-1).
- [30] A. Hassn, M. Aboufoul, Y. Wu, A. Dawson, A. Garcia, Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 115, 327-335, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.106>
- [31] D. Mrawira, J. Luca, Effect of aggregate type, gradation and compaction level on thermal properties of hot-mix asphalts. Canadian Journal Of Civil Engineering, 33(11), 1410-1417, 2011. <https://doi.org/10.1139/106-076>
- [32] H. M. Al-Baijat, The use of basalt aggregates in concrete mixes in Jordan. Jordan Journal of Civil Engineering, 2(1), 63-70, 2008.
- [33] S. N. Leung, Thermally conductive polymer composites and nanocomposites: processing-structure-property relationships. Composites Part B: Engineering, 150, 78-92, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.056>
- [34] C. Huang, X. Qian, R. Yang, Thermal conductivity of polymer nanocomposites. Materials Science and Engineering: R: Reports, 132, 1-22, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2018.06.002>
- [35] M. Saçak, Polimer Teknolojisi, Gazi Kitabevi, Ankara, 2014.
- [36] F. Hussain, S. Roy, K. Narasimhan, K. Vengadassalam, H. Lu, E-Glass-Polypropylene Pultruded Nanocomposite: manufacture, characterization, thermal and mechanical properties. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 20(4),2007. <https://doi.org/10.1177/0892705707079604>







## Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı bisiklet yolu güzergâhı araştırması Geographical information systems based cycle route research

Ahmet Atalay<sup>1,\*</sup> , İbrahim Say<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum Türkiye (8 punto)

### Öz

Son yıllarda kişisel sağlık, enerji, çevre ve ekonomi açısından sağladığı faydalardan dolayı kent içi ulaşımda bisikletin kullanım oranının arttırılması gündeme gelmiştir. Bisiklet kullanım oranının artmasında önemli olan faktör kentlerde bisiklet yollarının yapılmasıdır. Bisiklet yolları bisiklet kullanıcılarının talebi dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Bisiklet kullanıcılarının yoğun olarak kullandıkları güzergahların belirlenmesi bisiklet yolunun verimliliği açısından önemlidir. Çalışma kapsamında bisiklet kullanıcılarının coğrafi konum verilerini kullanarak en uygun bisiklet yolu güzergahı belirlenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma alanı olarak Erzincan ili seçilmiştir. Çalışma kapsamında bisiklet kullanıcılarının mobil uygulama olarak telefonlarına yüklenen GPS takip programı aracılığıyla coğrafi veri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak, bisiklet kullanıcılarının günlük seyahatlerinde başlangıç ve varış noktaları arasındaki kullandıkları güzergahlar belirlenmiştir. Elde edilen verilerle mekânsal analiz yapılarak bisiklet kullanıcılarının yoğun olarak kullandığı güzergahlar belirlenmiştir. Çalışma sonucunda Erzincan ili için bisiklet yolu güzergâh önerileri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Bisiklet, Güzergah belirleme, CBS, Kernel yoğunluk

### 1 Giriş

Bisiklet ulaşım türü kent içi ulaşımın rahatlatılmasında son yıllarda öne çıkan bir seçenek haline gelmektedir. Kent içi ulaşım; kentlerin insanlar için olduğu düşüncesinden yola çıkarak, öncelikli olarak insanların rahat hareket etmesini sağlayacak yaya ve bisiklet ulaşım türleri üzerinde durulmasının, kentlilerin kentsel etkinliklere erişimlerini kolaylaştıracağıdır [1]. Kentlerde etkin bir erişilebilirlik sağlamak için bisikleti önemli bir ulaşım aracı olarak göz önünde bulundurmak gerekir [2]. Son yıllarda çevre ve sağlık açısından insanların daha da bilinçlenmesi ile bisiklet kullanımı hızla artmaktadır. Bundan dolayı bisiklet kent içi ulaşımın önemli bir parçası olarak görülmektedir [3]. Bisiklet ulaşım türü düşük erişim maliyeti ve orta seyahat hızına sahiptir. Bunun yanında, trafik tıkanıklığını azaltır, çevrenin korunmasına yardımcı olur ve sağlık yönünden birçok fayda sağlar [4]. Bisikletin sağlık yönünden sağladığı faydalar; zinde ve sağlıklı hissetmek, mutlu hissetmek, iş ve normal yaşantının getirdiği stres faktörlerinden uzaklaşmak olarak sıralanmaktadır [5]. Kentlerde bisiklet kullananların

### Abstract

In recent years, increasing the use of bicycles in urban transportation has come to the fore due to the benefits it provides in terms of personal health, energy, environment and economy. The important factor in increasing the rate of bicycle use is the construction of bicycle paths in cities. Bicycle paths should be designed considering the demand of bicycle users. Determining the routes frequently used by bicycle users is important for the efficiency of the bicycle path. Within the scope of the study, it is aimed to determine the most suitable bicycle path route by using the geographical location data of bicycle users. Erzincan province was chosen as the study area. Within the scope of the study, geographic data was obtained through the GPS tracking program installed on the mobile application of the bicycle users. Using this data, the routes used by bicycle users between the starting and destination points in their daily trips were determined. Spatial analysis was made with the data obtained and the routes used by bicycle users were determined. As a result of the study, bicycle route suggestions for Erzincan province were determined.

**Keywords:** Bcycle, Route chose, GIS, Kernel density

sayısını arttırmak başlıca bir amaç değildir. Ayrıca bisiklet günlük yaşam, iş ve belki de turizm için kentin erişilebilirliğini, yaşanabilirliğini ve genel çekiciliğini arttırmanın bir yoludur [6]. Trafik sıkışıklığı, iklim değişikliği ve hareketsiz yaşam tarzlarının zararlı sonuçları konusundaki kaygılar, son zamanlarda bir ulaşım türü olarak bisiklet kullanımını teşvik edici çalışmalara neden olmuştur [7]. Bisikletin kent içi ulaşımda verimli bir şekilde kullanılması bisiklet altyapısının oluşturulmasına bağlıdır. Bu amaçla, ABD'nin Palo Alto şehrinde 1998-2010 yıllarını kapsayan Bisiklet Planı yapılmıştır. Bu plandaki amaç; tek kişilik taşıt kullanımını azaltmak, yaya ve bisiklet sürücülerine yüksek güvenlik seviyesini sağlamak ve insanlara bisiklet ve yürüyüşü teşvik edecek altyapı olanaklarını sağlamaktır. Ayrıca kentte bulunan kamu alanlarına erişimi sağlamada, yapılacak cadde tasarımları ile otomobil kullanımının azaltılması için özel programlar hazırlanmıştır [8].

Bisiklet altyapısının eksikliği bisiklet kullanıcılarını alternatif yollar aramaya sevk etmektedir [9]. Bisiklet

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahatalay@atauni.edu.tr (A. Atalay)

Geliş / Recieved: 26.10.2021 Kabul / Accepted: 14.03.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1014733

kullanıcılarına, seyahatlerinin başından sonuna kadar kendilerini güvende hissedebileceği kapsamlı bir bisiklet yol ağı sağlanmalıdır [6]. Bisiklet ulaşımı kentlerde genellikle motorlu araç trafiği ile birlikte ve nadiren ayrılmış olarak kullanılmaktadır. Ayrılmış bir bisiklet altyapısının hızlı bir şekilde geliştirilmesinin, daha önce bisiklete binme kültürü olmayan şehirlerde bisiklet kullanımının kent içi hareketliliğin önemli bir parçası olabileceğini göstermektedir [10]. Bisiklet altyapısının şehir planları, ulaşım uzmanları ve halk sağlığı yetkilileri arasında bisiklet kullanma ve aktif yaşam tarzlarını teşvik etmek için anahtar bir bileşen olduğu kabul edilmiştir [7]. Bisiklet altyapısı hazırlanırken dikkate alınması gereken etkenlerden biri de bisiklet yolunun güzergâhıdır. Güzergâhın ana gezi kuşağında, cazibe noktaları ile bağlantılı olması ve yürüme mesafesinin altında olup şehrin diğer kısımlarından kolayca erişilebilir olması gerekir. Bisiklet yol ağlarının güvenlik, tutarlılık, yakınlık, rahatlık ve eğlence olmak üzere beş gereksinimi karşılaması gerekir [11]. Ulaşım aracı olarak bisikletin diğer ulaşım sistemlerine entegrasyonu için belirlenen bisiklet yolu güzergâhlarının mevcut kent içi ulaşım hatları ile kesişen hatlar olarak tasarlanması gerekmektedir [12]. Bisiklet yolu güzergâhı belirlenirken şehrin fiziksel, çevresel ve görsel özellikleri göz önüne alındığı bir türel çerçevesinde çalışılmalıdır. Bisiklet yolu planlaması için genellikle ilk olarak bir aday bisiklet yolu seçilir. Geliştirme yöntemi ve önceliği, seçilen güzergâhın güvenliği ve bisiklet kullanıcılarının seyahat davranışları incelendikten ve mevcut alan değerlendirildikten sonra belirlenir. Bisikletler tarafından yoğun talep gören güzergâhlar, birçok durumda ağı çerçevesini oluşturacak olan ağ aday güzergâhı olarak seçilmektedir [3]. Bu çalışmada, bisiklet kullanıcılarının günlük kullandıkları güzergâhlar esas alınarak bisiklet yolu güzergâhı araştırması yapılmıştır. Bisiklet kullanıcılarının güzergâhları coğrafi konum verileri kullanılarak belirlenmiştir. Coğrafi konum verileri bisiklet kullanıcılarının akıllı cep telefonlarına FollowMee GPS takip programı yüklenerek elde edilmiştir. Elde edilen veriler ile mekânsal analiz yöntemi kullanılarak bisiklet kullanıcılarının yoğunluk haritası elde edilmiştir. Mekansal analiz için Arcgis CBS(Coğrafi Bilgi Sistemleri) yazılımı kullanılmıştır.

Bilgi teknolojilerinin gelişmesiyle kent içi ulaşım planlamaları sürecinde kitle kaynaklı verilerin kullanılması üzerinde durulmaktadır. Romanillos vd. [13] GPS (Global Positioning System) verilerinin, hareketlilik verilerinin ve yolculuk verilerinin son yıllarda kent ve ulaşım planlaması çalışmalarında yaygın olarak kullanıldığını vurgulamışlardır. Ayrıca bu veri kümelerinin birbirleriyle ve daha geleneksel olarak sağlık, sosyo-demografik ve ulaşım verileri ile birleştirip kentler için yeni öngörüler yapılabileceğini belirtmişlerdir. Musakwa ve Selala [14] bisiklet seyahatleri için en kapsamlı verinin GPS verileri ile elde edilebileceğini ve araştırmacılar için en kapsamlı veriyi oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ton et al., [15] türel tahmini için DDPI (Data Driven Path Identification) yaklaşımı, ek bilgi veya güzergâh oluşturma için ağ verilerine ihtiyaç duymadan bireylerin tercihleri hakkında bilgi sağladığından, mevcut seçim seti oluşturma yöntemlerine faydalı bir katkı

sağladığını belirlemişlerdir. Park & Akar [9] bisiklet kullanıcılarının akıllı telefonları aracılığı ile toplanan GPS verileri kullanarak bisiklet seyahatlerinin sapma uzunluğunu ve güzergâh seçiminin çevresel faktörlerle ilişkilerini incelemişlerdir. McArthur & Hong [16] insanların hangi güzergâhlarda bisiklet kullandığını ve bisiklet ulaşım türünü daha iyi analiz etmek için yeni veri formlarının nasıl kullanılabileceğini incelemek amacıyla Strava mobil uygulaması verilerini kullanmışlar. Krenn et al., [17] GPS ve CBS ölçüm yöntemleri kullanarak Avusturya'nın Graz şehrinde kullanılan ve mümkün olan en kısa bisiklet yollarındaki farklılıkları mesafe, cadde türü ve çevresel özellik göstergelerini dikkate alarak incelemişlerdir. Hochmair et al., [18] yolculuk amaçları ve haftanın günlerinin bisiklet yolculuğuna etkisini belirlemişlerdir. Çalışmada Strava mobil uygulamasının GPS verilerinin yüksek çözünürlüklü ve kapsamlı veriler olduğundan dolayı bu verilerin çalışmanın başarısına büyük katkı sağladığını belirtmişlerdir. Thigpen et al., [19] bisiklet kullanıcılarının yoğun olarak kullandıkları güzergâhları mekânsal analiz yöntemini kullanarak belirlemişlerdir. Ayrıca çalışmada altyapı yönünden eksiklik olan bakım ihtiyacı bulunan yerler belirlenmiştir. Musakwa ve Selala [14] bisiklet seyahatleri için en kapsamlı verinin GPS verileri ile elde edilebileceğini ve araştırmacılar için en kapsamlı veriyi oluşturduğunu belirtmişlerdir.

Suzuki et al., [3] bisiklet yol güzergâhı, bisiklet trafiği hacmine ve bisikletlilerin güzergâh seçim tercihine göre belirlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Boss, et al., [20] bisiklet ulaşım türü için gerekli altyapının yapılması veya geçici olarak bisiklet yolunun kapatılmasının şehirdeki birden fazla yerleşim alanındaki etkisini ve bisiklet trafik hacmindeki değişiklikleri Strava mobil uygulaması verilerini kullanarak tespit etmişlerdir.

Lee ve Sener [21] şehir ulaşım ağlarında bisiklet türlerini ortaya çıkaran Strava Metro verilerini kullanarak, Teksas El Paso'daki bisikletlilerin trafikle ilgili hava kirliliğine maruz kalma riskini incelemişler. Trafiğin yoğun olduğu yollarda ve trafiğin yoğun olduğu saatlerde düzenli olarak seyahat eden bisikletlilere rehberlik edecek ve kentte yaşayan insanlar için karayolunda bisiklet sürmenin sağlık açısından etkilerini belirlemişlerdir.

Bisiklet kullanıcıların seyahatlerini akıllı telefon uygulamaları ile kaydetmeye başlaması, araştırmacıları bisiklet kullanım oranlarını izlemek ve bisiklet ulaşım türü ile ilgili çalışmalarını değerlendirmek için bu uygulamalardan üretilen verileri kullanmaya yönlendirmiştir [22]. GPS verileri ile seyahat davranışlarının araştırılması bisiklet altyapısının nasıl kullanıldığını daha kolay anlaşılmasını sağlamaktadır. Ayrıca planlamacılar, politika yapıcılara ve mühendisler için güvenli ve çekici insan odaklı kentsel alanlar oluşturma çabalarında yardımcı olmaktadır [23].

Yapılan literatür incelemesinde GPS konum bilgileri kullanılarak bisiklet yolu güzergâhı belirlenmesi çalışması dünya genelinde belirli sayıda olmakla beraber ülkemizde böyle bir çalışma olmadığı belirlenmiştir. Bu çalışma bu yönüyle literatürdeki boşluğu doldurması ve katkı sağlaması umulmaktadır.

Bu çalışmada hali hazırda bisiklet yolunun olmadığı bir şehirde bisiklet kullanıcılarına ait GPS verileri ile seyahat başlangıç noktası ile varış noktası arasında bisiklet kullanıcıları tarafından tercih edilen rotalar belirlenerek bisiklet yolu güzergâhı için bir öneri sunulmak amaçlanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

Bu çalışmanın materyalini bisiklet kullanıcılarından elde edilen GPS verileri oluşturmaktadır. Çalışmanın metodu ise GPS verileri kullanılarak CBS yazılımında mekânsal analiz araçlarından yoğunluk analizi yapılmış ve Kernel yoğunluk haritası elde edilmiştir.

### 2.1 Materyal

Bu çalışmada bisiklet kullanıcılarının günlük kullandıkları başlangıç ve varış noktaları arasındaki güzergahları gözlemek için mobil uygulama kullanılmıştır. Bunun için server aboneliği alınan FollowMee GPS Tracker uygulaması 48 gerçek bisiklet kullanıcısının akıllı cep telefonuna yüklenmiştir. Uygulamayı yükleyen bisiklet kullanıcılarından her bisiklet seyahati başlangıcında uygulamayı açıp seyahat sonunda ise kapatmaları istenmiştir. Bu sayede bisiklet kullanıcılarının seyahatleri başlangıç ve varış noktaları arasındaki kullandıkları güzergah verileri elde edilmiştir. Bu kapsamda 15 Ekim-15 Kasım 2019 tarihleri arasında bisiklet kullanıcılarının seyahat verileri toplanmıştır.

Bu çalışmada Erzincan şehri bisiklet kullanımına elverişli topoğrafyası, ortalama yağışlı gün sayısı ülke ortalaması 134 iken Erzincan şehrinde 107.7 olması, bisiklet kullanıcılarının oranının yüksek olması ve şehir merkezinde mevcut bir bisiklet yolunun olmaması gibi özelliklerinden ötürü çalışma alanı olarak seçilmiştir.

### 2.2 Metot

Literatürde CBS tanımlarına göre; verileri toplayan, işleyen ve sunan bir araç; ya da karmaşık konumsal bilgileri kontrol eden bir sistemdir[24]. Çeşitli veri kümelerini birçok şekilde birleştirme yeteneği ile CBS, arkeolojiden zoolojiye kadar neredeyse her bilgi alanı için yararlı bir araçtır [25].

Bazı araştırmacılar, CBS'yi mekânsal bilgi sistemlerinin tamamını kapsayan ve coğrafi bilgiyi araştıran bilimsel bir kavram olarak tanımlamışlardır. Bazıları ise konumsal bilgileri sayısallaştıran bilgisayar destekli bir araç olarak tanımlamışlardır [26; 27]. CBS'de her veri kümesi bir katman olarak yönetilir ve analitik operatörler kullanılarak (grafik analizi olarak adlandırılır) grafiksel olarak birleştirilebilir. CBS, işlemleri ve ekranları kullanarak katmanları birleştirerek, kritik önemdeki soruları keşfetmek ve bu soruların yanıtlarını bulmak için bu katmanlarla çalışmaya olanak tanır [28].

GPS çalışmalarına ABD Savunma Bakanlığı tarafından ilk olarak 1973 yılında askeri amaçlarla NAVSTAR (Navigation System Using Time And Ranging) tarafından başlanmıştır. GPS uydulardan yayınlanan radyo sinyalleri yardımıyla her türlü hava koşullarında, gece ve gündüz, süratli, doğru ve ekonomik olarak noktalar arası üç boyutta konum belirleme sistemidir. Navigasyon ihtiyacına yönelik olarak tasarlanan sistem, konumlanmanın yanı sıra çok

duyarlı zaman ve hız belirleme olanağı sunar [29]. GPS, bir bireyin konumunu herhangi bir zamanda ve dünyanın yüzeyinde herhangi bir noktada tanımlamak için kullanılabilen uydu tabanlı bir küresel navigasyon sistemidir. GPS'in bir diğer avantajı, objektif dijital harita verilerinin kullanılmasıyla GPS güzergahındaki çevresel özellikleri analiz etmek için CBS ile birleştirilebilmesidir [17].

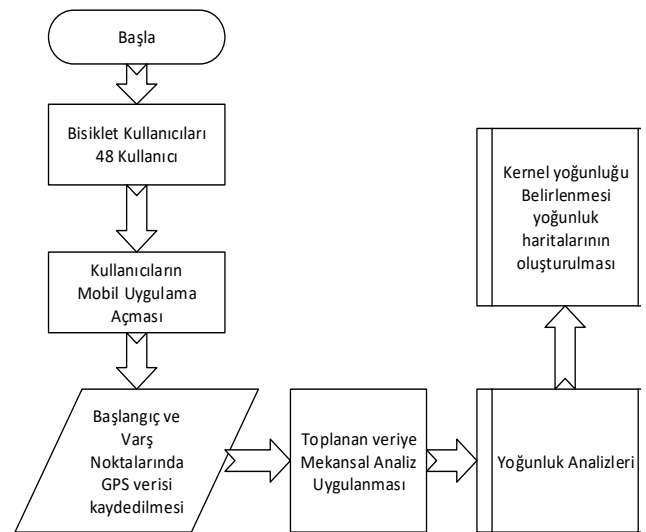
### 2.2.1 Mekansal analiz

Mekânsal analiz, mekânsal verinin hesaplamalı analizini, optimum güzergahların bulunmasını, yer seçimini ve gelişmiş tahmin yapabilen kapsamlı bir yöntemdir. Ancak son kırk yılda, karmaşık mekânsal problemleri çözmeye kabiliyeti, küresel konumlandırma sistemleri, gerçek zamanlı sensörler, navigasyon sistemleri ve en önemlisi CBS'yi içeren teknolojilerle gün geçtikçe artmaktadır[30].

Coğrafi konumlarla ilişkilendirilen birçok veri ve ölçüm, haritaya yerleştirilebilir. Mekânsal veriler kullanılarak hem neyin mevcut olduğu hem de nerede olduğu belirlenebilir. Farklı veri türlerini içeren katmanları ve bu katmanlarda bulunan her verinin nerede bulunduğu ve birbirleriyle karşılaştırma fikri, mekânsal analizin temel kavramlarıdır [28].

Navigasyondan eğlence amaçlı kullanımlara, haritalamadan hassas ölçüm ve CBS'ye kadar, GPS'in her yerde bulunan doğası hayatımızı olumlu bir şekilde etkilemektedir. Bu uygulamaların çoğu, bazıları gerçek zamanlı olmak üzere kesin pozisyonlar sağlamaktadır. GPS, CBS kullanıcılarının coğrafi verileri toplama ve yönetme biçimini değiştirmektedir. GPS'in sağladığı yüksek doğruluk, CBS uzmanlarının verilerini yeni yollarla depolamasına ve yönetmesine sahiptir [25].

Bu çalışmada bisiklet kullanıcılarının GPS verilerinin analizi bir CBS uygulaması olan ArcGis uygulaması üzerinde mekânsal analiz aracı kullanılarak yapılmıştır. GPS verileri kullanılarak bisiklet seyahatlerinin yoğunluk haritaları Kernel yoğunluğu kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 1'de belirtilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın akış diyagramı

### 2.2.2 Yoğunluk analizleri

Olasılık yoğunluğu fonksiyonu istatistiklerde temel bir kavramdır. Olasılık yoğunluğu fonksiyonu  $f$  olan rastgele herhangi bir  $X$  miktarını düşünün.  $f$  işlevinin belirtilmesi,  $X$  dağılımının doğal bir tanımını verir ve  $X$  ile ilişkili olasılıkların **Denklem (1)** de belirtildiği üzere ilişkiden bulunmasını sağlar [31].

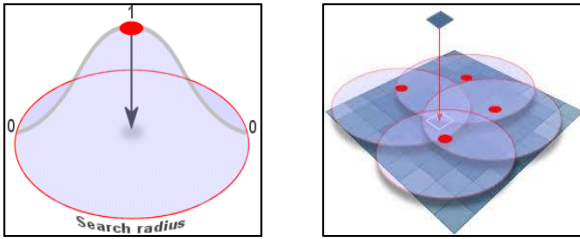
$$P(a < X < b) = \int_a^b f(d)dx, a < b \text{ için} \quad (1)$$

Yoğunluk fonksiyonu nokta ve çizgi yoğunluklarını belirlemek için kullanılır. Örneğin, kilometrekareye düşen nüfus yoğunluğu, kilometrekareye düşen yağmur vb. Yoğunluk analizi sayılabilir nesnelere (iş yerleri, ağaçlar, deprem merkezleri vb.) ve bunların öznitelikleri (işyerinde çalışan kişi sayısı, ağaç tipleri, deprem merkezi büyüklükleri vb.) üzerinde uygulanır [25].

Yoğunluk fonksiyonu yoğunluğu hesaplamak için iki metot kullanılır: simple ve kernel. Her iki metotta da yoğunluğu hesaplamak için dairesel bir bölge veya tarama bölgesi kullanılır. Bu çalışmada Kernel yoğunluk metodu kullanılmıştır.

### 2.2.3 Kernel yoğunluğu

Kernel metotta her bir hücreye değil, örnek her bir nokta etrafına dairesel bir alan çizilir ve noktanın bulunduğu yerden dairesel alan sınırına doğru 1'den 0'a doğru giden matematiksel bir fonksiyon uygulanır (**Şekil 2**).



Şekil 2. Kernel yoğunluğu

### 2.2.4 Kernel tahmincisi

$(x_1, x_2, \dots, x_n)$  serisinin, olasılık dağılım fonksiyonu  $f(x)$  bilinmeyen bir  $X$  popülasyonundan alınan  $n$  sayıda gözlemin bağımsız ve aynı şekilde dağıtılmış bir örneği olmasına izin verilir. Orijinal  $f(x)$ 'in çekirdek tahmini  $f^{\wedge}(x)$ , her  $i$ 'inci örnek veri noktasına  $x_i$ , çekirdek işlevi olarak adlandırılan bir işlev  $K(x_i, t)$  atar [31]:

$$f^{\wedge}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K(x_i, t) \quad (2)$$

$K(x, t)$  negatif değildir ve tüm  $x$  ve  $t$  için sınırlıdır:  
 $0 \leq K(x, t) < \infty$  tüm gerçek  $x, t$  için ve tüm gerçek  $x$  için,

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(x, t) dt = 1 \quad (3)$$

**Denklem (3)** çekirdek yoğunluğu tahmininin **Denklem (2)** normleştirilmesini sağlar:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^{\wedge}(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} K(x_i, t) dt = 1 \quad K(t) \quad (4)$$

$$= f(x) \quad (4)$$

$$= \begin{cases} \frac{15}{16} (1 - t^2)^2 & \text{for } |t| < 1 \\ 0 & \text{for } |t| \geq 1 \end{cases}$$

Başka bir deyişle, çekirdek  $x_i$ 'nin "keskin" (nokta) konumunu  $x_i$  etrafında ortalanan (simetrik olarak ya da simetrik olmayan) bir aralığa dönüştürür (**Denklem (4)**).

Bant genişliği olarak da bilinen arama yarıçapını belirlemek için kullanılan formül aşağıda açıklanmıştır:

$$h = 0.9 * \min \left( SD, \sqrt{\frac{1}{\ln(2)}} * D_m \right) n^{-2} \quad (5)$$

**Denklem (5)** de;  $h$ , bant genişliği.  $D_m$ , ağırlıklı ortalama; merkezden ağırlıklı ortanca mesafedir.  $n$ , popülasyon alanı kullanılmadığında veya bir popülasyon alanı sağlandığında nokta sayısıdır,  $n$ , popülasyon alanı değerlerinin toplamıdır.  $SD$  standart mesafedir.

Not: Denklemdeki  $\left( \sqrt{\frac{1}{\ln(2)}} * D_m \right)$ ,  $SD$  değerlerinden küçük olanı kullanılır.

$$SD_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (x_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n w_i} + \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n w_i} + \frac{\sum_{i=1}^n w_i (z_i - \bar{Z})^2}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (6)$$

**Denklem (6)** da  $w_i$ ,  $i$  özelliğindeki ağırlıktır.  $\{x_w, y_w, z_w\}$  ağırlıklı ortalama merkezi temsil eder.

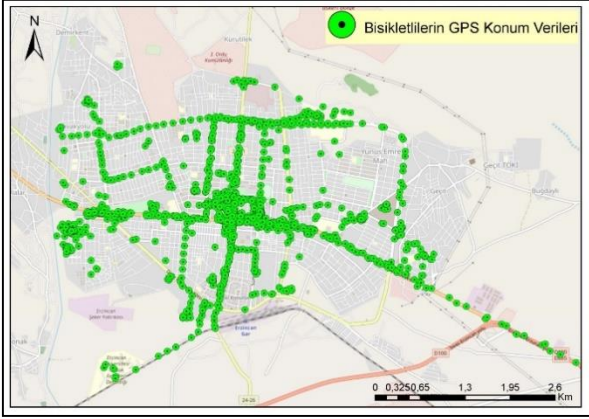
## 3 Bulgular ve tartışma

Geleneksel veri toplama yöntemlerinden bisiklet sayımları genellikle pahalıdır, sınırlı bir mekânsal kapsamı içerir ve güncel değildir [14]. Bundan dolayı çalışmada bisiklet kullanıcılarının GPS verileri kullanılarak günlük olarak seyahat başlangıcından varış noktasına kadar kullandıkları güzergahları belirlenmiştir. Ayrıca gerçek zamanlı seyahat davranış verileri elde edilmiştir. Bisiklet kullanıcılarının seyahat esnasında çizdikleri güzergâhlar yüksek doğruluklu güzergâh tercih verisi olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan GPS takip programın Apple marka mobil telefonlarda saniyede 1 gps noktası, diğer android telefonlarda 10 saniyede 1 gps noktası göstermektedir.

Erzincan ilinde bisiklet yolu mevcut olmadığından bisiklet kullanıcıları motorlu taşıt yolunu kullanmaktadırlar. Bundan dolayı bisiklet kullanıcılarının GPS verileri daha çok ana caddelerde toplandığı görülmektedir (**Şekil 3**).

Düşük sokak bağlantısı ve bisiklet altyapısı eksikliği, bisiklet kullanıcılarının ara sokaklarda verimli bir şekilde gezinmelerini zorlaştırmaktadır [9].





Şekil 3. Bisiklet kullanıcılarının GPS verileri [31]

Bu çalışmada bisiklet kullanıcılarının seyahat davranışlarını elde etmek amacıyla kitle kaynaklı veri sağlayıcısı olan FollowMee mobil uygulaması kullanılmıştır. Literatürde kitle kaynaklı veri sağlayıcılar kullanılarak bisiklet güzergah araştırması yapılan çalışmalar az sayıda bulunmaktadır. Bu çalışmalardan birinde McArthur ve Hong, bisiklet kullanıcılarının başlangıç ve varış güzergahları, hangi yolları kullandıkları ve kavşaklarda ne kadar bekleyecekleri hakkında bilgileri elde etmek için kitle kaynaklı (Strava) uygulamasını kullanmışlardır[16]. Bu konuda yapılmış başka çalışmada Musakwa ve Selala, bisiklet ulaşım türü hakkında karar alma ve politikaların oluşturulması söz konusu olduğunda, kitle kaynaklı verilerin faydalı bir araç olabileceğini vurgulamışlardır[14].

GPS ve CBS'nin birleşik uygulaması, büyük çalışma popülasyonlarında bisiklete binmeyi destekleyen veya engelleyen çevresel özellikleri tanımlamak için yararlıdır

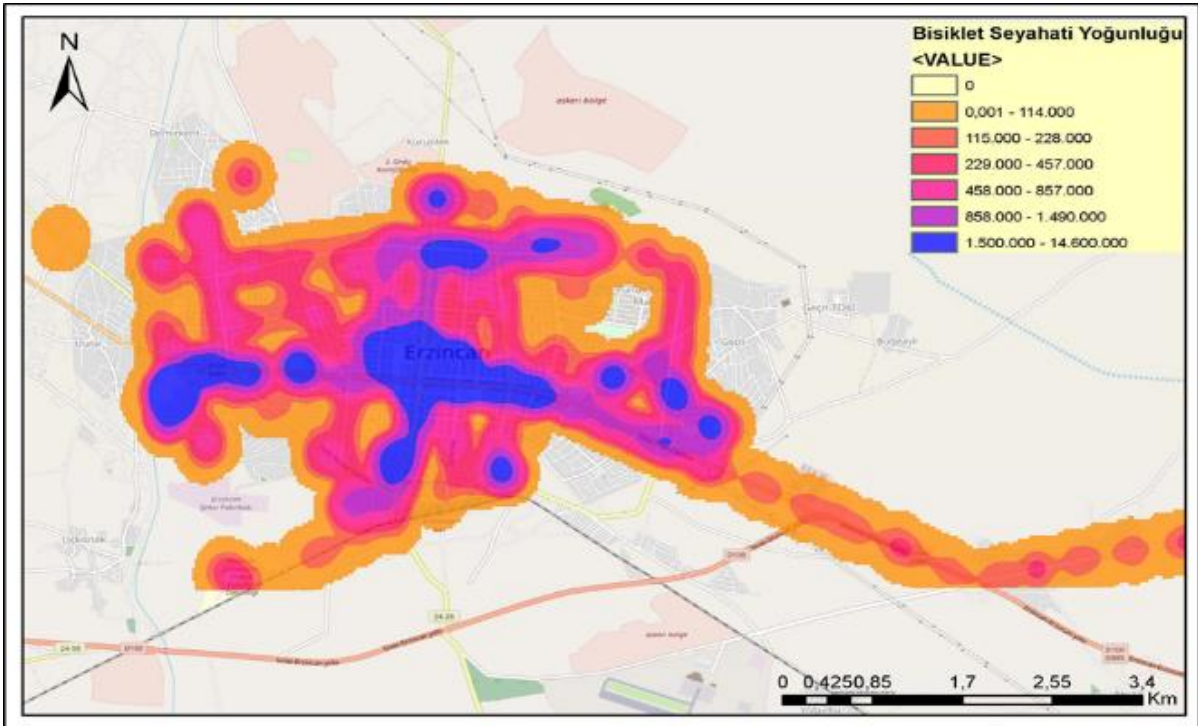
[17]. Çalışmada bisiklet kullanıcılarının yoğun olarak kullandıkları güzergâhları belirlemek amacıyla CBS yazılımında mekânsal analiz araç kutusunda bulunan yoğunluk analizi yöntemi ile yoğunluk haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4).

Bisiklet kullanıcılarının yoğun olarak kullandıkları güzergâhlar kullanıcı tercihleri hakkında fikir verdiğinden dolayı yoğunluk haritaları oluşturulmuştur. Bu yoğun güzergâhlar bisiklet kullanıcıları için bisiklet yolu ihtiyacı olan güzergâhlar olarak kabul edilebilir (Şekil 4).

Yoğunluk haritasının lejantındaki değerler, her hücre için birim alan başına çekirdek yoğunluk değerini temsil eder.

Bisiklet seyahatlerinin en yoğun olduğu bölgeler lacivert rengi ile boyalı kesimlerdir. Mor renk ile boyalı bölgeler, lacivert boyalı bölgelere göre daha az yoğunluklu bisiklet seyahatlerinin olduğu bölgelerdir. Bisiklet seyahatinin en az olduğu bölgeler ise sarı renk ile boyalı bölgelerdir (Şekil 4).

Yoğunluk haritasında bisiklet seyahatlerinin şehrin ticaret merkezleri ve kamu binaları etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmektedir (Şekil 4). Mevcutta bir bisiklet yolu tesisi olmaması yüksek çekim merkezleri olan bu bölgelerde bisiklet kullanıcılarını motorlu taşıt trafiği içinde seyahat etmeye yönlendirmektedir. Motorlu taşıt trafiği içinde bisiklet kullanma aynı zamanda trafik güvenliği bakımından risk oluşturmaktadır. Aynı zamanda bisiklet kullanım oranlarını azaltmaktadır. Bisiklet yolu tesislerinin olmayışı bisiklet kullanmayı zorlaştırmakta ve bunun neticesinde çocukların veya bisiklet kullanmaya yeni başlayanların bisikleti bir ulaşım aracı olarak kullanmamasına neden olmaktadır. İnsanları motorlu taşıt yolundan farklı bir güzergâha yönlendirmek zor olabilir. Bunun yerine bisiklet kullanıcılarının kullandıkları güzergâhların güvenli bisiklet yoluna dönüştürülmesi gerekmektedir.



Şekil 4. Bisiklet kullanıcı güzergahlarının yoğunluk haritası [31]

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada bisiklet kullanıcılarının seyahat başlangıç ve varış noktaları arasında GPS verileri kullanılarak bisiklet yolu güzergâh araştırması yapılmıştır. GPS verileri kitle kaynaklı veri sağlayıcısı FollowMee mobil uygulaması kullanılmıştır. Bisiklet kullanıcıları ile yüz yüze görüşülerek mobil uygulamayı kullanmaları sağlanmıştır. Bisiklet kullanıcılarının seyahat başlangıcından varış noktasına kadar uygulamayı açık tutmaları belirtilmiştir. Bu şekilde bisiklet kullanıcılarının başlangıç ve varış noktaları arasındaki güzergâhlarına ait GPS verileri elde edilmiş ve yoğun olarak kullanmış oldukları güzergâhlar belirlenmiştir. Elde edilen GPS verileri içerisinde uygun olmayan eksik veriler excell programında ayıklanmıştır. Düzenlenen veriler CBS yazılımına aktarılmış ve mekânsal analiz araç kutusunda ham veri dağılımı ve yoğunluk haritaları oluşturulmuştur. Yoğunluk haritası Kernel yoğunluk haritası olarak oluşturulmuştur. Oluşturulan yoğunluk haritasından Erzincan ilindeki bisiklet kullanıcılarının güzergâhları yoğunluk derecelerine göre belirlenmiştir.

Çalışmada mevcut bisiklet kullanıcılarının yoğun olarak kullandıkları güzergâhların bisiklet yolu güzergâhı için uygun olduğu görüşü benimsenmiştir. Bisiklet kullanıcılarının şehrin ticaret ve kamu binalarının etrafında yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bisiklet kullanıcıların yolculuklarında daha çok ana caddeleri kullandıkları tespit edilmiştir. Ana caddelerdeki motorlu taşıt trafiği içinde yüksek bisikletli yoğunluğu bulunması güvenlik problemini düşündürmektedir. Ana caddelerin etrafında kamu ve ticaret binalarının bulunması bisikletlileri bu caddelere çekmektedir. Ayrıca ana caddelerin erişebilir olması, bu yoğunluğun ana caddelerde olmasında bir etkidir. Bisiklet kullanıcılarının günlük ihtiyaçları için (alışveriş, resmi işler vb.) ana caddeleri kullandıkları düşünülürse onları daha güvenli seyahat için daha az motorlu taşıt trafiği olan yan caddelere yönlendirmek pek muhtemel görünmemektedir. Çünkü şehrin ticaret ve kamu binaları ana cadde üzerinde toplanmıştır. Bunun yerine ana caddelerde araba yolunun en sağına güvenli bir bisiklet şeridi yapmak çok daha mantıklı bir fikir olarak düşünülebilir.

Tüm bisiklet kullanıcılarının akıllı cep telefonu kullanmaması, kullandığımız GPS takip programının internet ile çalışması, insanların güven eksikliğinden dolayı GPS takip programını telefonlarına yüklemek istememesi çalışmadaki verilerin elde edilmesi aşamasındaki olumsuz unsurlardır. Bundan dolayı çalışmada kısıtlı veri ile analiz yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda daha fazla bisiklet kullanıcının GPS verisine ulaşılması halinde motorlu araç trafiğinin bisiklet kullanıcılarının tercih ettikleri rotalara etkisi araştırılabilir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %12**

#### Kaynaklar

[1] Y. Kuyumcu, Bir ulaşım aracı olarak bisiklet ve Çorum ili kent içi ulaşımında bisiklet yolu önerisi. Yüksek

- Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2017.
- [2] H. Gonzalo-Orden, A. Linares, L. Velasco, J.M. Diez, and M. Rojo, Bikeways and cycling urban mobility. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 160, 567-576, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.170>
- [3] K. Suzuki, Y. Kanda, K. Doi, and N. Tsuchizaki, Proposal and application of a new method for bicycle network planning. *Procedia-social and behavioral sciences*, 43, 558-570, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.129>
- [4] G. Akar, and K. J. Clifton, Influence of individual perceptions and bicycle infrastructure on decision to bike. *Transportation research record*, 2140(1), 65-172, 2009. <https://doi.org/10.3141/2140-18>
- [5] F. Koçak, Türkiye’de bisiklet kullanımı: bisiklet kullanma nedenleri ve elde edilen faydalar. *Journal of Human Sciences*, 13(3), 5760-5771, 2016. <https://doi.org/10.14687/jhs.v13i3.4190>
- [6] P. Note, Smart choices for cities Cycling in the City, 2016.
- [7] J. Larsen, and A. El-Geneidy, A travel behavior analysis of urban cycling facilities in Montréal, Canada. *Transportation research part D: transport and environment*, 16(2), 172-177, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.07.011>
- [8] A. Narcı, Bisiklet Yolu Planlaması, İstanbul-haliç Örneği. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [9] Y. Park, and G. Akar, Why do bicyclists take detours? A multilevel regression türel using smartphone GPS data. *Journal of transport geography*, 74, 191-200, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.11.013>
- [10] R. Marqués, V. Hernández-Herrador, M. Calvo-Salazar, and J. A. García-Cebrián, How infrastructure can promote cycling in cities: Lessons from Seville. *Research in Transportation Economics*, 53, 31-44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.10.017>
- [11] R. Tolley, Sustainable transport. Elsevier, 2003.
- [12] ÇŞB, Şehir İçi Bisiklet Yolları Kılavuzu. 98, 2017.
- [13] Romanillos, G., M. Zaltz Austwick, D. Ettema, and J. De Kruijff, Big data and cycling. *Transport Reviews*. 36(1), 114-133, 2016.
- [14] W. Musakwa, and K.M. Selala, Mapping cycling patterns and trends using Strava Metro data in the city of Johannesburg, South Africa. *Data in brief*, 9, 898-905, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2016.11.002>
- [15] D. Ton, D. Duives, O. Cats, and S. Hoogendoorn, Evaluating a data-driven approach for choice set identification using GPS bicycle route choice data from Amsterdam. *Travel behaviour and society*, 13, 105-117, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2018.07.001>
- [16] D. P. McArthur, and J. Hong, Visualising where commuting cyclists travel using crowdsourced data. *Journal of transport geography*, 74, 233-241, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.11.018>

- [17] P. J. Krenn, P. Oja, and S. Titze, Route choices of transport bicyclists: a comparison of actually used and shortest routes. *International journal of behavioral nutrition and physical activity*, 11(1), 31, 2014. <https://doi.org/10.1186/1479-5868-11-31>
- [18] H. H. Hochmair, E. Bardin, and A. Ahmouda, Estimating bicycle trip volume for Miami-Dade county from Strava tracking data. *Journal of transport geography*, 75, 58-69, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.01.013>
- [19] C. Thigpen, J. Fischer, T. Nelson, S. Therrien, D. Fuller, L. Gauvin, and M. Winters, Who is ready to bicycle? Categorizing and mapping bicyclists with behavior change concepts. *Transport policy*, 82, 11-17, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.07.011>
- [20] D. Boss, T. Nelson, M. Winters, and C. J. Ferster, Using crowdsourced data to monitor change in spatial patterns of bicycle ridership. *Journal of Transport & Health*, 9, 226-233, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2018.02.008>
- [21] K. Lee, and I. N. Sener, Understanding Potential exposure of bicyclists on roadways to traffic-related air pollution: Findings from El Paso, Texas, using Strava metro data. *International journal of environmental research and public health*, 16(3), 371, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030371>
- [22] M. D. Garber, K. E. Watkins, and M. R. Kramer, Comparing bicyclists who use smartphone apps to record rides with those who do not: Implications for representativeness and selection bias. *Journal of Transport & Health*, 15, 100661, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100661>
- [23] R. Pritchard, D. Bucher, and Y. Frøyen, Does new bicycle infrastructure result in new or rerouted bicyclists? A longitudinal GPS study in Oslo. *Journal of transport geography*, 77, 113-125, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.05.005>
- [24] T. Yomralıoğlu, Coğrafi bilgi sistemleri: Temel kavramlar ve uygulamalar, İber Ofset, İstanbul, 2000.
- [25] A. Leick, GIS Best Practices—Using GIS with GPS. Environmental Science Research Institute. 2009.
- [26] O. Altan, G. Toz, and S. Külür, Bilgi Sistemindeki Gelişmeler ve Fotogrametri. CBS Sempozyumu, 63-66, İstanbul, Türkiye, 26-28 Eylül 1996.
- [27] C. Harder, and C. Brown, The ArcGIS book: 10 big ideas about applying the science of where. Esri Press, 2017.
- [28] D. Wells, N. Beck, A. Kleusberg, E. J. Krakowsky, G. Lachapelle, R. B. Langley, K.P. Schwarz, J. M. Tranquilla, P. Vanicek, and D. Delikaraoglu. Guide to GPS positioning. in Canadian GPS Assoc. Citeseer, 1987.
- [29] Esri, The language of spatial analysis. Esri Press. 49, Redlands, USA, 2013.
- [30] B. W. Silverman, Density estimation for statistics and data analysis, 26. CRC press, 1986.
- [31] İ. Say, Erzincan İli Bisiklet Yolu Güzergahı Araştırması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye, 2020.







# Acid red-20 sentetik endüstriyel boyar maddenin elektro-oksidasyon yöntemi ile sulu çözeltiden uzaklaştırılması

## Removal of acid red-20 synthetic industrial dyestuff from aqueous solution by electro oxidation method

Jülide Erkmen<sup>1,\*</sup> , Mahmut Adıgüzel<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Kafkas Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü Kars/Türkiye

<sup>2</sup> Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü Erzurum/Türkiye

### Öz

Bu çalışmada Acid Red 20 sentetik endüstriyel hafif azoboyar maddenin elektro-oksidasyon ile sudan uzaklaştırılması prosesi çalışılmıştır. Anot olarak Titanyum katot olarak ise çelik kullanılmıştır. 100 mg/L sabit boya konsantrasyonunda ve ön denemeler sonucunda en uygun akım yoğunluğu olan 033 A/m<sup>2</sup> de çalışıldı. Arıtma prosesi üzerinde kullanılan tuz türünün (NaCl, NaCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>NO<sub>3</sub> ve KC), tuz konsantrasyonunun (0.025 M, 0.050 M, 0.075 M ve 0.1 M), ortam pH' sının (doğal, 3, 5, 7, 9 ve 11) ve karıştırma hızının (0, 150 rpm, 300 rpm ve 450 rpm) etkisi incelendi. Sonuç olarak proses için en uygun tuzun KCl olduğu belirlendi. Arıtım proseslerinde de en önemli giderim enerji olduğu göz önünde bulundurularak en uygun tuz konsantrasyonu 0.075 M KCl olarak belirlendi. Renk giderimi ve KOİ giderim veriminin karıştırma hızının artışıyla arttığı görüldü. Sulu çözeltiden Acid Red 20 giderim verimi için %99.5 gibi önemli değere ulaşıldı. Elde edilen sonuçlar elektro-oksidasyon yönteminin hafif azoboyaların sulardan giderilmesinde kullanılabilir bir yöntem olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Elektro-oksidasyon, Acid red 20, Boyar madde, Renk giderimi

### 1 Giriş

Endüstrinin gelişmesi ile birlikte çevreye verilen atık suların miktarı da artmıştır. Çevreye temizlenmeden verilen atık sular, çevre ve insan sağlığını ciddi bir tehlike ile karşı karşıya bırakmıştır. Dolayısıyla bu kirlenmeyi önlemek için atık su arıtımı günümüzde daha fazla önem kazanmıştır. Özellikle var olan arıtma yöntemlerine ek olarak ucuz, sürdürülebilir çevre dostu yöntemler geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır [1-4]. Boyar madde içeren atık suyun ıslahı ve yeniden kullanılması, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir kullanımı için çok önemlidir.

Atık sular organik maddeler, katılar, inorganik maddeler, emülsiyonlar, toksinler ve farmasötik maddeler gibi kompleks kirletici karışımları içerir [5]. Adsorpsiyon [6-7], pıhtılaşma [8], membran filtrasyonu [9] ve kimyasal oksidasyon [10] gibi klasik fiziksel ve kimyasal yöntemler pahalı yatırımlardır, membran kirlenmesi, toksik ara ürün

### Abstract

In this study, the process of removing Acid Red 20 synthetic industrial light azo dyestuff from water by electro-oxidation was studied. Titanium was used as the anode and steel was used as the cathode. 100 mg / L constant dye concentration and as a result of preliminary tests, the optimum current density was 033 A / m<sup>2</sup>. The type of salt used on the purification process (NaCl, NaCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>NO<sub>3</sub> and KC), salt concentration (0.025 M, 0.050 M, 0.075 M and 0.1 M), environment pH (natural, 3, 5, 7, 9 and 11) and the effect of stirring speed (0, 150 rpm, 300 rpm and 450 rpm) was investigated. As a result, it was determined that the most suitable salt for the process was KCl. Considering that energy is the most important expense in treatment processes, the optimum salt concentration was determined as 0.075 M KCl. It was observed that the color removal and COD removal efficiency increased with increasing mixing speed. Achieved an important value of 99.5% for removal efficiency of Acid Red 20 from the aqueous solution. The results obtained showed that the electro-oxidation method can be used to remove light azo dyes from water.

**Keywords:** Electro-oxidation, Acid red 20, Ddyestuff, Color removal

oluşumu, çamur ve ikincil kirletici maddelerin üretilmesi gibi bazı dezavantajları da olsa tekstil atıklarındaki boyaları giderebilir [11].

Endüstriyel boyaların çoğu, toksik, kanserojen ve büyük miktardaki boyaların ekosisteme salınması zararlıdır [12-14]. Acid red 20 boyar maddelerin en zararlı türlerinden biri olan azo boyalar gurubuna girer. Azo boyalar toksik olduğundan oluşan atık suyun arıtılması gerekmektedir. Azo boyaları tekstil, plastik, gıda ve kozmetik endüstrilerinin atık sularında önemli bir kirletici sınıftır [15-17]. Tekstil endüstrisi su kirliliğinin en büyük problemi boya atıklarıdır. Bu atıkların çevre ve insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olduğu bilinmektedir. Atıktan boya temizlemenin dezavantajlarını giderebilecek çevre dostu ve maliyeti uygun, fiziksel veya kimyasal yöntemlerin geliştirilmesi ekonomik kayıpları önlemek açısından önemlidir [18]. Tekstil sanayisi boyama, yıkama ve apreleme için fazla

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: jerkmen@hotmail.com. (J. Erkmen)

Geliş / Received: 06.01.2021 Kabul / Accepted: 06.01.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.854958



miktarda su ve kimyasal madde tüketen prosesleri içermektedir. Boyama atık suları içerisinde önemli miktarda boya banyo kalıntıları ve boyarmaddeler bulunmaktadır [19-21].

Bu nedenle boyar madde içeren tekstil endüstrisi atık sularında renk giderim prosesleri kullanılmaktadır. Miktarı ve içeriği dikkate alındığında tekstil endüstrisinden kaynaklanan atık sular tehlikeli ve toksik bileşikleri içerirler, sanayinin çevre açısından en kirli atıklarındandır [22-23]. Boyar maddelerin giderimi büyük oranda fiziksel ve kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilmektedir [24]. Ancak bu yöntemlerin birçoğunun maliyeti oldukça yüksektir. Bu durum hem çevresel hem de ekonomik anlamda ciddi derecede zararın oluşmasına sebep olur. Tekstil atıklarının haminin büyük oluşu yüksek maliyetli olduğundan birçok fiziksel ve kimyasal yöntemin kullanımını sınırlamaktadır [25]. Tekstil boyama ve apreleme endüstrisinde gerçekleşen büyüme sonucunda, farklı boyalarla yardımcı kimyasalları içeren, kompleks yapılarından dolayı bilinen arıtma yöntemleri ile arıtılmayan atık sular da ortaya çıkmıştır. Bu sebeple son yıllarda doğal boyalara dönülerek sentetik boyaların zararlarından kurtulma çalışmalarına başlanmıştır [23,26-27]. Tablo 1' de tekstil atıklarının arıtılması için kullanılan teknolojiler karşılaştırılmıştır.

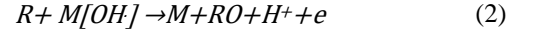
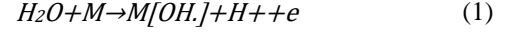
**Tablo 1.** Tekstil atıklarının arıtılması için çeşitli teknolojilerin değerlendirilmesi [28,29]

Proses - Uygulama Alanı	Performans	Dezavantajları
Fenton oksidasyonu Ön arıtma	Tam renk giderimi, düşük maliyet ve işletme maliyeti	Asidik pH Çamur oluşumu
Elektroliz-Ön arıtma	Tam renk giderimi, ucuz	Köpüklenme
Filtrasyon - Ana veya son arıtma	Yüksek performans, su ve tuz geri kazanımı	Konsantrasyon akımının ele alınması ve bertarafı
Biyolojik Ayrıştırma/Aktif Çamur Ana arıtma	KOİ, N giderimi	Yüksek artan KOİ, N, renk ve deterjan
Koagülasyon/Flokülasyon Ön, ana ve son arıtma	Tam renk giderimi, suyun geri kullanımı	Her zaman etkili değil, çamur bertarafı
Ozonlama- Son arıtma	Tam renk giderimi, suyun geri kullanımı	Pahalı, aldehit oluşumu
Adsorpsiyon- Ön ve son arıtma	Yeni adsorbentler etkili ve ucuz, suyun geri kullanımı	Yüksek bertaraf veya rejenerasyon maliyeti
Fotokataliz - Son arıtma	Renk ve toksik giderimi	Sadece son arıtma amaçlı

Küresel olarak, her yıl ilgili endüstriyel atık sularda 2,8.10<sup>5</sup> ton tekstil boyasının boşaltıldığı tahmin edilmektedir. Elektrokimyasal yöntemlerle su arıtımına ilgi son yıllarda artmıştır. Elektrokimyasal oksidasyon, farklı organik kirleticileri azaltmak, içme suyunu ve belediye atık sularını dezenfekte etmek için başarıyla uygulanmıştır [30-32].

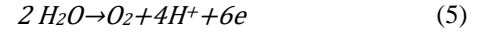
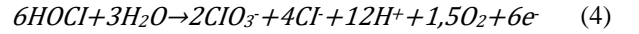
Atık suyun elektrokimyasal oksidasyonu için mekanizma, elektron transfer reaksiyonunun ayrılmış bir kemisorpsiyon adımı ile birleştirilmesini içeren karmaşık bir fenomendir. Organik madde (R) bozunmasından sorumlu olduğu düşünülen iki mekanizma vardır: (a) kirleticilerin anot yüzeyinde (M) adsorbe edildiği ve anodik elektron

transfer reaksiyonu ile yok edildiği doğrudan anodik oksidasyon ve (b) elektrokimyasal olarak oluşan oksidanların aracılık ettiği sıvı yığılma dolaylı oksidasyon; bu tür oksidanlar arasında klor, hipoklorit, hidroksil radikalleri, ozon ve hidrojen peroksit yer alır. Anodik su deşarjı, anot yüzeyinde adsorbe olan ve daha sonra organik maddeyi oksitleyebilen hidroksil radikallerinin oluşmasına neden olur [33].

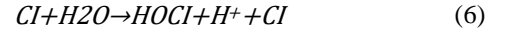


Örneğin hipoklorit organik maddeleri oksitleyebilen önemli bir oksitleyicidir. Hipokloridin organik bileşikleri oksitlemesi esnasında çözeltide, anotta ve katotta meydana gelen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [34].

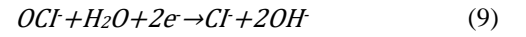
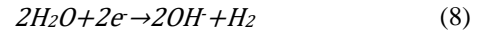
Anodik reaksiyonlar:



Çözelti reaksiyonları:



Katodik reaksiyonlar:



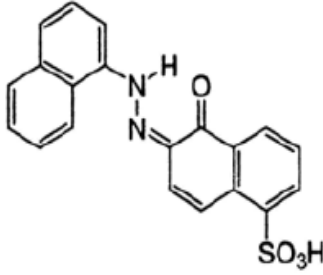
Bu çalışmada membran filtrasyon gibi maliyetli yüksek ayırma işlemlerine alternatif olarak daha ekonomik bir ayırma işlemi olan elektro-oksidasyon yöntemi ile sulu çözümlerden Acid Red 20 boyar maddesinin ayrılması amaçlanmıştır. Farklı tuz türleri kullanılarak sistem için uygun tuz türü belirlenmesi ve bu tuz ile belirlenen şartlarda boyar maddenin sulu çözümlerden uzaklaştırılması çalışılmıştır. Özellikle tekstil sanayinde kullanılan azo boyaların yüksek oranda atık su tüketimini önlemek için bu tür boyaların sulu çözümlerden uzaklaştırılmasında elektro-oksidasyon yönteminin uygun bir yöntem olup olmadığı araştırılmıştır.

## 2 Materyal ve metod

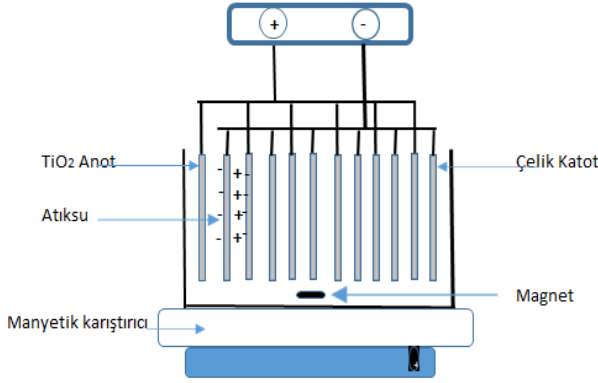
Şekil 1'de kimyasal yapısı gösterilen ve Sigma firmasından tedarik edilen Acid Red 20 boyar maddesinin sulu çözümlerden giderilmesi çalışılmıştır.

Elektrokimyasal bozunma deneyleri, tezgâh üstü bölünmemiş bir elektrolitik hücrede yapılmıştır. Deneyler 1 litrelik bir çalışma numunesi hacminde bir hücre kullanılarak galvanostatik koşullar altında gerçekleştirilmiştir. DC güç kaynağı olarak Maksimel DC akım gerilim kaynağı

kullanılmıştır. Titanyum anot ve çelik katot kullanılmıştır. Voltmetre ve ampermetre olarak (AA-Tech ADM-3055 dijital milimetreler) kullanılmıştır. Anot ve Katot levhaları 10 cm x 5 cm ebatlarında ve 0.2 cm kalınlığında sırasıyla TiO<sub>2</sub> ve paslanmaz çelikten imal edilerek kullanılmıştır. Bu levhalar iki fiber glass plaka arasına yerleştirilmiştir. Anot ve katot levhalar arasında 0.5' er cm mesafe olacak şekilde 6' şar adet kullanılmıştır. Dizilim sırası (A-K-A-K-A-K-A-K-A-K-A-K) şeklindedir. Deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 2'de verilmiştir



Şekil 1. Acid Red 20 boyar maddesinin kimyasal yapısı



Şekil 2. Deney düzeneğinin şekli

Yapılan ön çalışmalarda en uygun akım yoğunluğu belirlenmiş, buna istinaden deneyler sabit akım yoğunluğu 0.33 A/m<sup>2</sup>'de çalışılmıştır. JSRC-13C soğutmalı laboratuvar sirkülasyonlu su banyosu cihazı kullanılarak reaktör sabit sıcaklıkta tutulmuştur. Çözelti Velp Scientifica Arex ısıtıcı manyetik karıştırıcı kullanılarak belirlenen hızlarda sürekli karıştırılmıştır. Numunenin pH' ı, Thermo Scientific Orion Star A211 pH metre kullanılarak ölçülmüştür. Absorbans değerleri (Mapada V-1100) UV visible spektrofotometre kullanarak 530 nm dalga boyunda ölçülmüştür. Sistem üzerinde karıştırma hızı, başlangıç tuz konsantrasyonu, tuz türü, pH akım yoğunluğu ve başlangıç boya konsantrasyonunun etkileri araştırılmıştır. Kullanılan tüm değişkenlerin değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Kimyasal oksijen ihtiyacı analizleri standart metotlarda [35] belirtilen kapalı sistem (reflux) yöntemine göre yapılmıştır. KOİ değeri bilinen numunelerin absorbans değerlerinden elde edilen grafikten yararlanılarak deneylerde elde edilen numunelerin KOİ değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen verilerden KOİ verim analizi yapılmıştır. Tüm

çözeltiler saf su ile hazırlanmıştır. Giderim verimliliği Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanmıştır

$$KOİ \text{ Giderim Verimi} = \frac{KOİ_1 - KOİ_2}{KOİ_1} \quad (10)$$

Burada KOİ<sub>1</sub> başlangıç KOİ değeri, KOİ<sub>2</sub> ise herhangi bir andaki KOİ değeridir. Enerji ve akım verimi hesapları aşağıdaki gibi yapılmıştır.

$$E. \text{ tüketimi} = \frac{V(\text{potansiyel}) * I * t}{V(\text{hacim})} \quad (11)$$

Burada; E enerji tüketim değerini (kWh /L), I uygulanan akım şiddetini (Amper), V sistemde oluşan potansiyel farkı (Volt) , t zamanı ve V reaktördeki toplam çözelti hacmini göstermektedir.

Akım verimi

$$\text{Akım verimi} = \frac{V(KOİ_1 - KOİ_2)F}{8I * t} \quad (12)$$

Burada; V sistemde oluşan potansiyel farkı (Volt), KOİ kimyasal oksijen ihtiyacı, F faraday sabiti, I akım ve t zamanı göstermektedir.

Herhangi bir su ve atık su arıtma yönteminin uygulanmasını büyük ölçüde etkileyen en önemli parametrelerden biri, arıtma işleminin maliyetini belirleyen işletme maliyetidir (İM). Malzeme maliyeti (kullanılan elektrotlar), kullanım maliyeti (kullanılan elektrik enerjisi), kimyasalların yanı sıra işçilik, bakım ve diğer sabit maliyetler dahil edilerek hesaplanmıştır. Bu çalışmada, İM hesaplamasında enerji, elektrot malzemesi ve kimyasal maliyetleri ana maliyet kalemleri olarak €/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır.

Tablo 2. Deneysel parametreler ve değerleri

	1	2	3	4	5	6
Karıştırma hızı (rpm)	0	150	300	450		
Tuz türü	NaCl	NaCO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> NO <sub>3</sub>	KCl		
Tuz kons. (M)	0.025	0.050	0.075	0.10		
pH	Doğal	3	5	7	9	11
Akım yoğunluğu A/m <sup>2</sup>	0.33	0.33	0.33	0.33		
Boya kons. Mg/L	100	100	100	100	100	

$$İM = a M_{\text{enerji}} + b M_{\text{elektrot}} + c M_{\text{kimyasallar}} \quad (13)$$

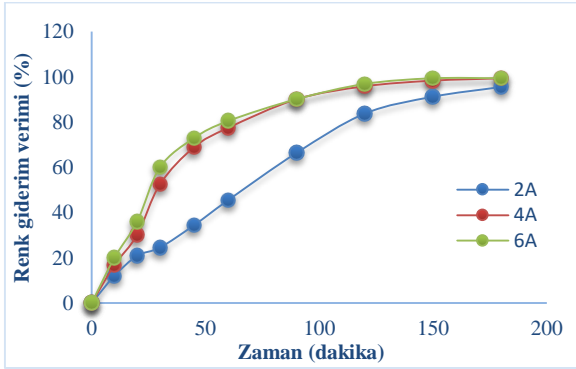
Burada M<sub>elektrot</sub> (kg/m<sup>3</sup>), M<sub>enerji</sub> (kWh/m<sup>3</sup>) ve K<sub>kimyasallar</sub> denklemdeki a, b ve c sabitleri. Kasım 2021'de Türkiye deki

elektrik enerjisi fiyatı (0.095 €/kWh), elektrot fiyatı (1.05 €/kg) ve kimyasal maliyet değerleri (0.42 €/kg NaCl, 0.94 €/kg NaCO<sub>3</sub>, 0.85 Na<sub>2</sub>NO<sub>3</sub> ve 0.64 €/kg KCl)

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 Akım yoğunluğunun etkisi

Akım yoğunluğu birim elektrot alanına düşen akım olarak tanımlanmaktadır [36]. Akım yoğunluğunun % KOİ ve % Renk giderimin verimine etkisini incelemek için 0.166 A/m<sup>2</sup>, 0.333 A/m<sup>2</sup>, 0.666 A/m<sup>2</sup> ve 1.332 A/m<sup>2</sup> olmak üzere 4 farklı akım yoğunluğunda çalışılmıştır. Şekil 3 ve 4'den görüldüğü gibi akım yoğunluğunun artışı ile KOİ verimi ve renk giderim veriminin arttığı görülmüştür [37]. Fakat artan akım yoğunluğunda enerji kullanımı hızı belirli bir noktadan sonra hızla artmaya devam ederken giderime etkisinin çok fazla olmadığı görülmüştür. Bu artış literatürle uygunluk göstermektedir [38-40]. Şekil 5'deki enerji kullanım değerleri ve renk giderim verimleri dikkate alındığında ise gereksiz enerji kullanımını önlemek açısından 0.333 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunun kullanılan prosese uygun bir çalışma akım yoğunluğu olduğu görüldü. Ayrıca oluşan gazların elektrot yüzeylerinde organik kirletici özelliği gösterdiği daha önceki çalışmalardan bilinmektedir ve anyonlu elektrolitler ise elektrot yüzeyinde belirli bir derişimden sonra birikerek, pasifizasyona sebep olmaktadır [40-44]. Bu nedenle tüm deneyler 180 dakika ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca deney sürelerinin uzatılmasının 180 dakikadan fazla uzun olmasının renk giderimini çok fazla etkilemediği ve fazladan enerji tüketimine sebep olduğu görülmüştür.

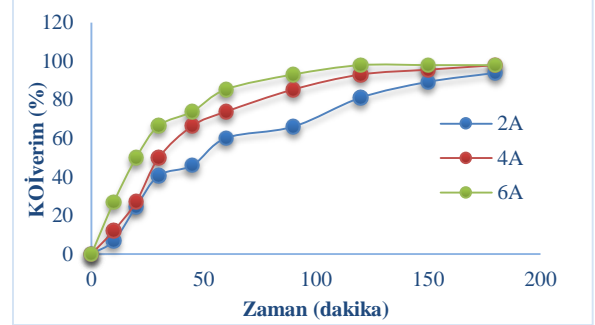


Şekil 3. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan 0.05 M KCl'nin farklı akım yoğunluğu değerlerinde renk giderim verimi (karıştırma hızı: 100 rpm, boya konsantrasyonu: 100 mg/L) (t=0 dk'da doğal renk ve Abs: 1.223)

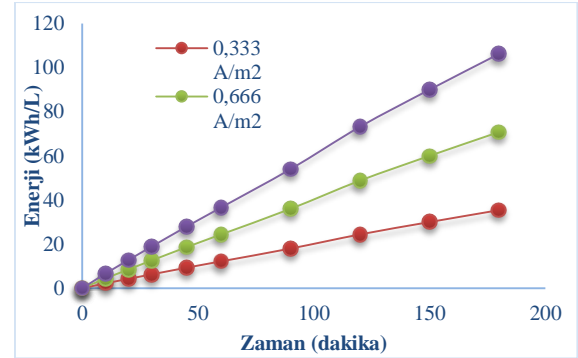
#### 3.2 Kullanılan tuz türünün etkisi

Çalışmanın ilk aşamasında destek elektrolit olarak farklı tuz türlerinin kullanılmasının verim ve enerji tüketimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 6' da dört farklı tuz ve 100 mg/L boya konsantrasyonu için 300 rpm karıştırma hızında, 0.33 akım yoğunluğunda çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde KOİ giderim veriminin kullanılan tuz türü ile değiştiği görülmüştür. Şekil 7'de 0.05 M NaCO<sub>3</sub> kullanılan çalışma ile 0.05 M NaCl' nin kullanıldığı çalışma arasında % 4.2 lik bir verim farkının olduğu görülmektedir.

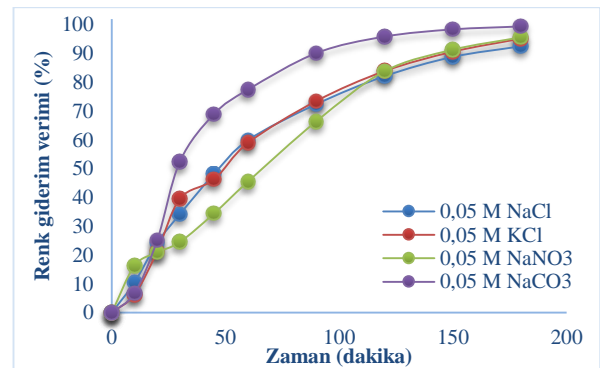
Kullanılan tuzlarda en yüksek enerji değeri 189.6 kWh/L ile NaCO<sub>3</sub> ve en düşük enerji değeri ise 35.4 kWh /L ile KCl olduğu görülmektedir. Renk giderim verimleri ise NaCO<sub>3</sub> için % 99 ve KCl için % 95'tir. KOİ giderim verimleri ise NaCO<sub>3</sub> için % 98 ve KCl için % 94'tür.



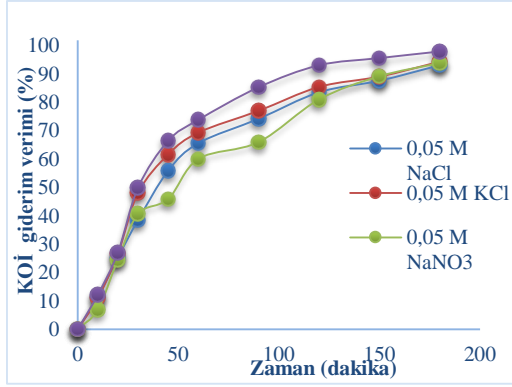
Şekil 4. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan 0.05 M KCl'nin farklı akım yoğunluğu değerlerinde KOİ giderim verimi (karıştırma hızı: 100 rpm, boya konsantrasyonu: 100 mg/L) (t=0 dk'da doğal renk ve Abs: 1.223)



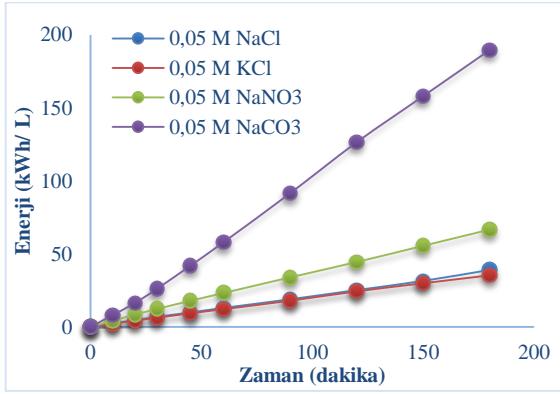
Şekil 5. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan 0.05 M KCl'nin farklı akım yoğunluğu değerlerinde enerji kullanımı (karıştırma hızı: 100 rpm, boya konsantrasyonu: 100 mg/L) (t=0 dk'da doğal renk ve Abs: 1.223)



Şekil 6. Acid Red 20 içeren sulu çözeltilerin renk giderim verimine kullanılan tuz türlerinin etkisi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg /L)



Şekil 7. Acid Red 20 içeren sulu çözeltilerin KOİ giderim verimine kullanılan tuz türlerinin etkisi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L)



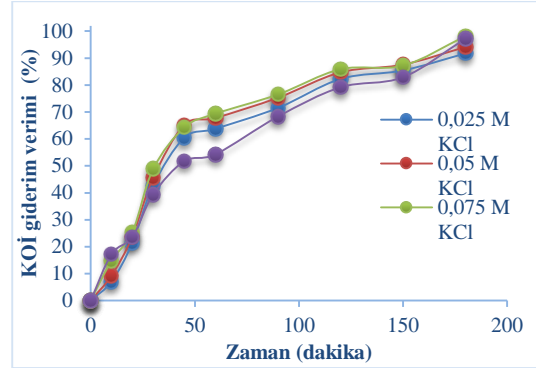
Şekil 8. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan tuz türlerinin enerji tüketimi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L)

Şekil 7 ve 8 incelendiğinde en iyi KOİ verimi olan tuz 0.05 M NaCO<sub>3</sub> iken enerji açısından bakıldığında en yüksek enerji tüketiminin yine bu değerde olduğu görülmektedir. Enerji maliyeti proseslerin seçiminde en önemli faktördür. Çünkü çevresel atık değerlendirme ve renk giderilme prosesleri işletme maliyeti açısından ilave yük demektir. Bundan dolayı maliyeti en düşük prosesler tercih edilmelidir. Giderim verimi %90 üzerinde olan prosesler uygulanabilir proseslerdir. Bu konular dikkate alındığında en doğru çalışma şartlarının bu çalışma için 0.05 M KCl olduğu görülmektedir.

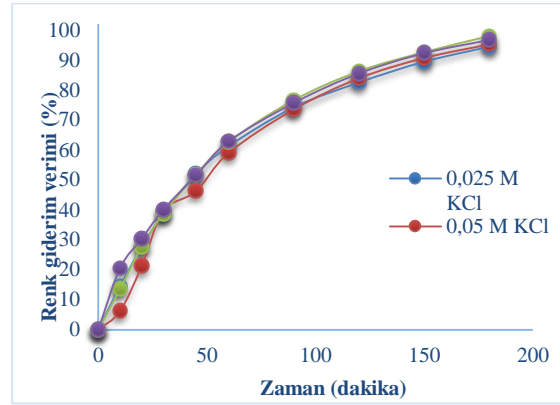
### 3.3 Tuz konsantrasyonunun etkisi

İlk aşamada tuz türünün etkisi ve seçilen tuzlardan KCl' nin bu sistem için uygun tuz olduğuna karar verildikten sonra bu tuzun konsantrasyon değişimlerinin sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak Şekil 9-10'da elektro-oksidadasyon proseslerinde tuz konsantrasyonu artışının KOİ veriminin artmasını sağladığı görülmektedir. Şekil 10-11 incelendiğinde proses üzerinde tuz konsantrasyonunun KOİ verimi ve renk giderim verimi üzerindeki etkisi incelendiğinde en yüksek verim 0.75 M KCl'de görülmektedir. Fakat Şekil 8 incelendiğinde ise en az enerji

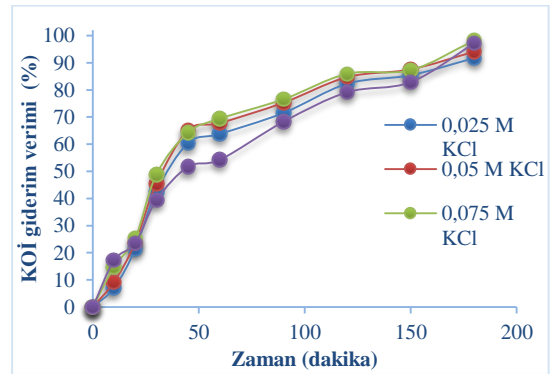
tüketiminin 0,1 M KCl değerinde olduğu görülmektedir. Hem KOİ hem de enerji kullanımı açısından düşünüldüğünde bu proses için en uygun çalışma koşulunun 0.75 M KCl olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan KCl'nin farklı konsantrasyonlarının KOİ giderim verimine etkisi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L)



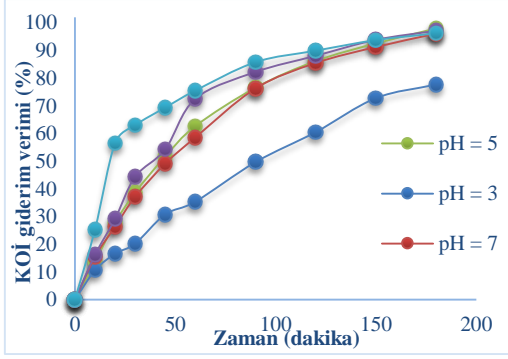
Şekil 10. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan KCl'nin farklı konsantrasyonlarının renk giderim verimine etkisi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L)



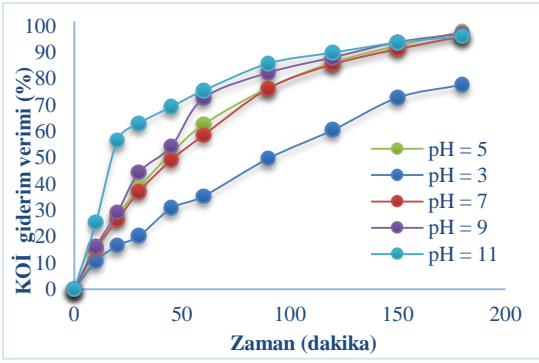
Şekil 11. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan KCl'nin farklı konsantrasyonlarının enerji kullanımına etkisi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L)



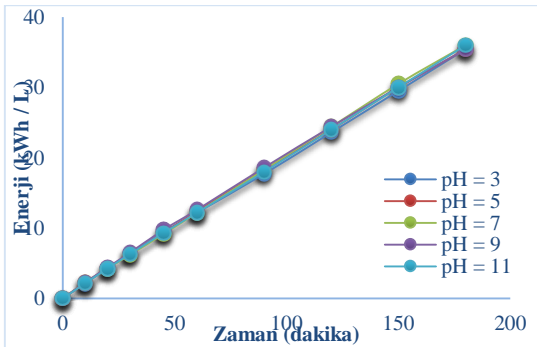
### 3.4 pH'in etkisi



Şekil 12. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan 0.075 M KCl'nin farklı başlangıç pH değerlerinde KOİ giderim verimine etkisi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L) (t=0 dk'da doğal renk ve Abs: 1.223)



Şekil 13. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan 0.075 M KCl'nin farklı başlangıç pH değerlerinde KOİ giderim verimine etkisi (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L) (t=0 dk'da doğal renk ve Abs: 1.223)

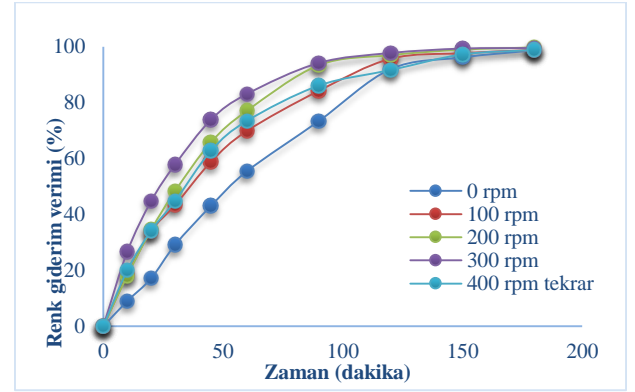


Şekil 14. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan 0.075 M KCl'nin farklı başlangıç pH değerlerinde enerji kullanımı (karıştırma hızı: 300 rpm, akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L) (t=0 dk'da doğal renk ve Abs: 1.223)

Başlangıç pH'sı elektro oksidasyon proseslerinde verimliliği etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Çünkü çözelti pH'sı oluşan hidroksit türlerinin kararlılığını etkiler ve organik boyar maddelerin sulu çözeltilerden giderilmesinde pozitif ya da negatif etkiler göstermesine sebep olabilir [44]. Şekil 14 incelendiğinde pH değişiminin enerji kullanımı üzerinde çok etkili olmadığı görülmektedir. Fakat Şekil 12, 13'e KOİ ve renk giderim verimi açısından bakıldığında bu sistem için özellikle pH 5 değerinden sonra KOİ giderim veriminin önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Nedeni ise pH'daki değişimin partiküllerin yüzey yükünü değiştirmesi ve bunun da çözelti içerisinde dağılmış halde bulunan organik maddelerin giderimini etkilemesidir. pH 11 en yüksek verimin elde edildiği değerdir.

### 3.5 Karıştırma hızının etkisi

Etkili bir dağılımın ve karıştırmanın sağlanması, tank içeriğinin homojen olmasına ve tank içerisinde her noktada çözeltinin homojen olmasına sebep olur. Ayrıca karıştırma işlemi tank içerisinde noktasal özelliklerin değişmesini önleyecektir [45]. Şekil 15, 16 incelendiğinde karıştırma hızının artışının KOİ verimi üzerinde olumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Artan karıştırma hızı ile hem çözelti içerisindeki tortuların çökmesi önlenmiş hem de elektrotlar üzerindeki olası tabaka oluşumları engellenmiştir. Elektrotlar üzerinde ve hücre tabanında biriken kalıntılar hücre direncinin artmasına dolayısıyla uygulanması gereken potansiyel şiddetin artmasına sebep olmaktadır. Potansiyel şiddetin artırılması enerji kullanımının artması ve ek maliyet demektir. Renk dönüşüm hızı çözeltinin iyi karıştırılmasıyla artış göstermiştir.

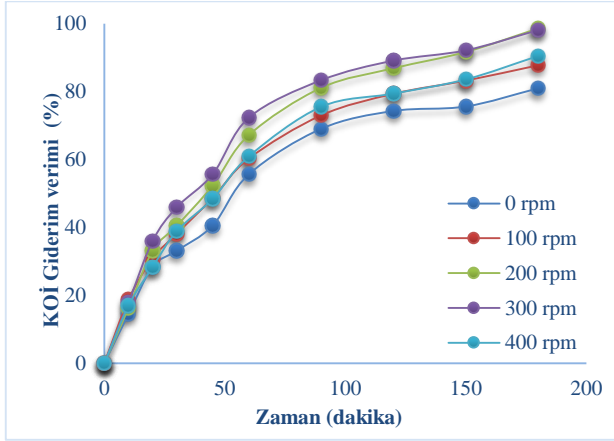


Şekil 15. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan 0.075 M KCl'nin farklı karıştırma hızlarında renk giderim verimine etkisi (akım yoğunluğu: 0.33A /m<sup>2</sup>, boya konsantrasyonu: 100 mg/L) (t=0 dk'da doğal renk ve Abs: 1.223)

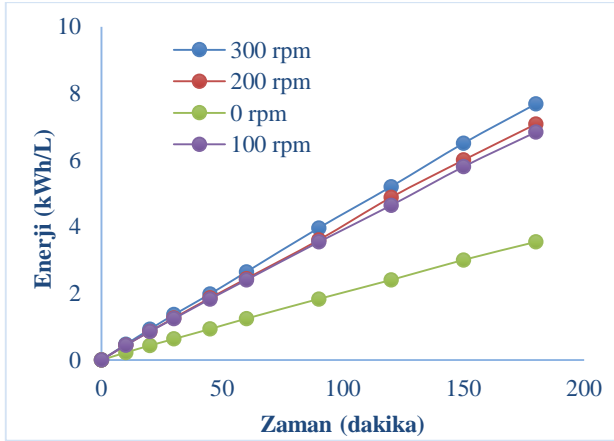
Şekil 17 incelendiğinde ise çok yüksek karıştırma hızlarında renk giderimi için daha fazla enerjiye ihtiyaç vardır bunun sebebi ise oluşan tortunun hızla karıştırılmasıyla çözeltide oluşan türbülansın elektrotlar arasındaki elektron hareketini engellemesidir. Çözeltinin durağan hali ile 300 rpm karıştırma hızında 180' ninci dakikada KOİ giderim verimi % 81 ile % 98'dir. Aradaki

fark geri kazanım prosesleri için çok önemli bir değerdir. Dolayısıyla bu çalışmanın benzer azo boyaların giderilmesi çalışmaları ile kıyaslandığında [46-51] renk ve KOİ giderimi açısından oldukça verimli bir çalışma olduğu görülmektedir.

Daha az işletme maliyeti ile daha iyi giderim verimleri sağlamak için optimum akım yoğunluğu  $0.33 \text{ mA/m}^2$  olarak belirlenmiştir. Bu akım yoğunluğunda enerji işletme maliyeti  $0.333 \text{ A/m}^2$  akım yoğunluğunda,  $0.075 \text{ M KCl}$ ,  $300 \text{ rpm}$  karıştırma hızı ve  $\text{pH } 11$  için  $22.7 \text{ €/m}^3$  olarak hesaplanmıştır.



Şekil 16 Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan  $0,075 \text{ M KCl}$ 'nin farklı karıştırma hızlarında KOİ giderim verimine etkisi (akım yoğunluğu:  $0.33 \text{ A/m}^2$ , boya konsantrasyonu:  $100 \text{ mg/L}$ ) ( $t=0 \text{ dk}$ 'da doğal renk ve Abs: 1.223)



Şekil 17. Sulu çözeltilerden Acid Red 20 gideriminde kullanılan  $0.075 \text{ M KCl}$ 'nin farklı karıştırma hızlarında enerji kullanımı (akım yoğunluğu:  $0.33 \text{ A/m}^2$ , boya konsantrasyonu:  $100 \text{ mg/L}$ ) ( $t=0 \text{ dk}$ 'da doğal renk ve Abs: 1.223)

#### 4 Sonuçlar

Dünyada su ihtiyacının artması ve temiz su miktarının azalması kirli suların arıtılmasının önemine dikkat çekmiştir. Suyun çok fazla kullanıldığı ve kirletildiği sektörlerden biri de tekstil sektörüdür. Boyar maddelerin kirlettiği sular bir dahaki üretimde renk sapmasına neden olmasından dolayı

tekrar kullanılamamaktadır. Bu yüzden tekstil sularındaki boyar maddelerin giderilmesi önemli bir konudur. Bu çalışmada hafif azo boyar maddelerden olan Acid Red 20 maddesi elektro-oksidasyon yöntemiyle sulu çözeltilerden giderilmeye çalışılmıştır. Akım yoğunluğunun sistem üzerindeki etkisi incelendiğinde, akım yoğunluğunun değerinin artışı ile birlikte enerji kullanımı artarken renk ve KOİ gideriminde aynı artışın doğrusal olarak gerçekleşmediği görülmüştür. Bu artış belirli bir noktadan sonra gereksiz enerji kullanımı anlamına gelmektedir. Bu proses için enerji verimliliği de dikkate alınarak en uygun koşullar  $0.333 \text{ A/m}^2$  akım yoğunluğunda,  $0.075 \text{ M KCl}$ ,  $300 \text{ rpm}$  karıştırma hızı ve  $\text{pH } 11$ 'dir. Bu şartlarda çalışmada % 99'a varan giderimler elde edilmiştir. Ayrıca tuz konsantrasyonu, karıştırma hızı,  $\text{pH}$ 'nin artışının sistem üzerinde olumlu etkiler verdiği ve en uygun tuzun  $\text{KCl}$  olduğu belirlenmiştir. Elektro-oksidasyon yönteminin Acid Red 20 gibi hafif azo boyaların atık sulardan gideriminde kullanılabileceği görülmüştür. Bu proses benzer azo boya giderme prosesleriyle kıyaslandığında Acid Red 20 maddesi için oldukça uygun bir proses olduğu görülmektedir. Fakat kullanılan boya türü, moleküler ağırlığı ve kullanılan elektrot türlerinin farklı olduğu ve bundan dolayı farklı davranışlar gösterebileceği göz ardı edilmemelidir

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): % 13

#### Kaynaklar

- [1] J. C. Cardoso, G. G. Bessegato, M. V. B. Zanoni, Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. Water research, 98, 39-46, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.004>.
- [2] J. C. Cardoso, G. G. Bessegato, M. V. B. Zanoni, Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. Water research, 98, 39-46, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.004>.
- [3] S. Bolisetty, M. Peydayesh, R. Mezzenga, Sustainable technologies for water purification from heavy metals: review and analysis. Chemical Society Reviews, 48(2), 463-487, 2019. <https://doi.org/10.1039/C8CS00493E>.
- [4] S. Zaman, A. Begum, K. Rabbani, L. Bari, Low cost and sustainable surface water purification methods using Moringa seeds and scallop powder followed by bio-sand filtration, Water Science and Technology: Water Supply, 17(1), 125-137, 2017. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.111>.
- [5] P. Bengani-Lutz, R. D. Zaf, P. Z. Culfaz-Emecen, A. Asatekin, Extremely fouling resistant zwitterionic copolymer membranes with ~ 1 nm pore size for treating municipal, oily and textile wastewater streams. Journal of Membrane Science, 543, 184-194, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.08.058>.

- [6] E. Kavci, Malachite green adsorption onto modified pine cone: Isotherms, kinetics and thermodynamics mechanism. *Chemical Engineering Communications*, 1-10, 2020 <https://doi.org/10.1080/00986445.2020.1715961>.
- [7] R. Wang, X. Cai, F. Shen, TiO<sub>2</sub> hollow microspheres with mesoporous surface: Superior adsorption performance for dye removal. *Applied Surface Science* 305, 352-358, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.089>.
- [8] S. Zodi, B. Merzouk, O. Potier, F. Lapique, J-P. Leclerc, Direct red 81 dye removal by a continuous flow electrocoagulation/flotation reactor, *Separation and Purification Technology* 108, 215-222, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.01.052>.
- [9] A. Zularisam, A. Ismail, R. Salim, Behaviours of natural organic matter in membrane filtration for surface water treatment—A review, *Desalination*, 194(1-3), 211-231, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.030>.
- [10] A. T. Sugiarto, S. Ito, T. Ohshima, M. Sato, J. D. Skalny, Oxidative decoloration of dyes by pulsed discharge plasma in water, *Journal of Electrostatics*, 58(1-2), 135-145, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(02\)00203-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(02)00203-6).
- [11] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, P. Nigam, Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative, *Bioresource Technology*, 77(3), 247-255, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8).
- [12] N. Puvaneswari, J. Muthukrishnan, P. Gunasekaran, Toxicity assessment and microbial degradation of azo dyes, 2006. <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/6554>.
- [13] M. T. Yagub, T. K. Sen, S. Afroze, H. M. Ang, Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review, *Advances in colloid and interface science*, 209, 172-184, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>.
- [14] D. Rawat, R. S. Sharma, S. Karmakar, L. S. Arora, V. Mishra, Ecotoxic potential of a presumably non-toxic azo dye, *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 148, 528-537, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.049>.
- [15] J. B. Parsa, M. Rezaei, A. Soleymani, Electrochemical oxidation of an azo dye in aqueous media investigation of operational parameters and kinetics, *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 997-1003, 2009 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.134>.
- [16] M. Rafatullah, O. Sulaiman, R. Hashim, A. Ahmad, Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 70-80, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.047>.
- [17] C. Ramírez, A. Saldaña, B. Hernández, R. Acero, R. Guerra, S. Garcia-Segura, E. Brillas, J.M. Peralta-Hernández, Electrochemical oxidation of methyl orange azo dye at pilot flow plant using BDD technology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19(2), 571-579, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.010>.
- [18] S. Sarkar, A. Banerjee, U. Halder, R. Biswas, R. Bandopadhyay, Degradation of synthetic azo dyes of textile industry: a sustainable approach using microbial enzymes. *Water Conservation Science and Engineering*, 2(4), 121-131, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41101-017-0031-5>.
- [19] P. Grau, Textile industry wastewaters treatment, *Water Science and Technology*, 24(1), 97-103, 1991. <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0015>.
- [20] A. Alinsafi, F. Evenou, E. Abdulkarim, M-N. Pons, O. Zahraa, A. Benhammou, A. Yaacoubi, A. Nejmeddine, Treatment of textile industry wastewater by supported photocatalysis. *Dyes and Pigments*, 74(2), 439-445, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.02.024>.
- [21] O. Türgan, G. Ersöz, S. Atalay, J. Forss, U. Welander. The treatment of azo dyes found in textile industry wastewater by anaerobic biological method and chemical oxidation. *Separation and Purification Technology*, 79(1), 26-33, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.03.007>.
- [22] P. C. Vandevivere, R. Bianchi, W. Verstraete, Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: Review of emerging technologies. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology*, 72(4), 289-302, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097).
- [23] P. Sakthisharmila, P. Palanisamy, P. Manikandan, Removal of benzidine based textile dye using different metal hydroxides generated in situ electrochemical treatment-A comparative study. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2206-2215, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.192>.
- [24] I. Koyuncu, D. Topacik, E. Yuksel, Reuse of reactive dyehouse wastewater by nanofiltration: process water quality and economical implications. *Separation and Purification Technology*, 36(1), 77-85, 2004. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00154-0).
- [25] C. R. Holkar, A. J. Jadhav, D. V. Pinjari, N. M. Mahamuni, A. B. Pandit, A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. *Journal of environmental management*, 182, 351-366, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>.
- [26] V. M. Correia, T. Stephenson, S. J. Judd, Characterisation of textile wastewaters-a review. *Environmental technology*, 15(10), 917-929, 1994. <https://doi.org/10.1080/09593339409385500>.
- [27] S. A. Wadhvani, U. U. Shedbalkar, S. Nadhe, R. Singh, B. A. Chopade, Decolorization of textile dyes by combination of gold nanocatalysts obtained from *Acinetobacter* sp. SW30 and NaBH<sub>4</sub>, *Environmental Technology & Innovation*, 9, 186-197, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.12.001>.
- [28] V. Gupta, K. Suhas, "Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review" *Journal of*

- Environmental Management, 90, 2313-2342, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- [29] R. Bianchi, W. Verstraete, P. C. Vandevivere, Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry; Review of emerging Technologies J. Chem. Technol. Biotechnol., 72, 289-302, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199808\)72:4<289::AID-JCTB905>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199808)72:4<289::AID-JCTB905>3.0.CO;2-%23)
- [30] L. Fan, Y. Zhou, W. Yang, G. Chen, F. Yang, Electrochemical degradation of aqueous solution of Amaranth azo dye on ACF under potentiostatic model. Dyes and pigments, 76(2), 440-446, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2006.09.013>.
- [31] H. Särkkä, A. Bhatnagar, M. Sillanpää, Recent developments of electro-oxidation in water treatment—A review, Journal of Electroanalytical Chemistry, 754, 46-56, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2015.06.016>
- [32] E. Isarain-Chávez, M. D. Baró, E. Rossinyol, U. Morales-Ortiz, J. Sort, E. Brillas, E. Pellicer, Comparative electrochemical oxidation of methyl orange azo dye using Ti/Ir-Pb, Ti/Ir-Sn, Ti/Ru-Pb, Ti/Pt-Pd and Ti/RuO<sub>2</sub> anodes. Electrochimica Acta. 244,199-208,2017. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.05.101>
- [33] M. Gotsi, N. Kalogerakis, E. Psillakis, P. Samaras, D. Mantzavinos, Electrochemical oxidation of olive oil mill wastewaters. Water Research, 39(17), 4177-4187, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.07.037>.
- [34] L. Chiang, J.E. Chang, T.C., Wen. Electrochemical treatability of refractory pollutants in landfill leachate, Hazardous Wastes and Hazardous Materials, 12(1), 71-82, 1995. <https://doi.org/10.1089/hwm.1995.12.71>.
- [35] APHA, AWWA and WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, Sixteenth ed. Washington, DC. pp. 76–538, 1985.
- [36] G. Chen, Electrochemical technologies in wastewater treatment, 38(1): 11-41, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.006>.
- [37] Y. Ş. Yıldız, Humik Maddeler İçeren Atık Suların Elektrokoagülasyon Metodu ile Arıtımı. 2003. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [38] C. H. Huang, L. Chen, and C. L. Yang, Effect of anions on electrochemical coagulation for cadmium removal, Separation and Purification Technology, 65, 137-146, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.10.029>
- [39] A. T. İrdemez, Elektrokoagülasyon Yöntemi ile Atıksulardan Fosfat Giderimi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 2004.
- [40] M. A. Ajeel, M. K. Aroua, W. M. A. W. Daud, S. A. Mazari, Effect of adsorption and passivation phenomena on the electrochemical oxidation of phenol and 2-chlorophenol at carbon black diamond composite electrode. Industrial & Engineering Chemistry Research, 56(6), 1652-1660, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b03422>
- [41] C. Y. Hu, S. L. Lo, and W. H. Kuan, Effect of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminium electrodes, Water Research, 37, 4513-4523, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00378-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00378-6)
- [42] B. Lin, R. Hu, C. Ye, Y. Li, and C. Lin, A study on the initiation of pitting corrosion in carbon steel in chloride-containing media using scannins electrochemical probes, Electrochimica Acta, 55, 6542-6545, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.06.024>
- [43] P.R. Kumar, S. Chaudhari, K.C. Khilar, S.P. Mahajan, Removal of arsenic from water by electrocoagulation, Chemosphere, 55 (9), 1245-1252, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.12.025>
- [44] P. Gao, X. Chen, F. Shen, G. Chen, Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation– electroflotation without a filter, Separation and Purification Technology, 43(2), 117–123, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.10.008>
- [45] K. Atmaca, N. Beyazıt, Colour and COD removal from aqueous solutions of direct yellow 86 textile dyestuff by electro-Fenton method. International Journal of Global Warming, 20 (4), 324-340, 2020. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.107151>
- [46] A. Karam, E. S. Bakhroum, K. Zaher, Coagulation/flocculation process for textile mill effluent treatment: experimental and numerical perspectives, International Journal of Sustainable Engineering, 1-13. 2020. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1842547>
- [47] D. Z. Mijin, V. D. Tomić, B. N. Grgur, Electrochemical decolorization of the reactive orange 16 dye using dimensionally stable Ti/PtOx anode. Journal of the Serbian Chemical Society, 80(7), 903-915, 2015. <https://doi.org/10.2298/JSC140917107M>.
- [48] S. El Aggadi, G. Kaichouh, Z. El Abbassi, M. Fekhaoui, A.E. Hourch, Electrode material in electrochemical decolorization of dyestuffs wastewater: A review. InE3S Web of Conferences (Vol. 234). EDP Sciences, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400058>
- [49] A. Baddouh, G.G. Bessegato, M.M. Rguiti, B. El Ibrahim, L. Bazzi, M. Hilali, M.V.B. Zanoni, Electrochemical decolorization of Rhodamine B dye: Influence of anode material, chloride concentration and current density. Journal of Environmental Chemical Engineering, 6(2), 2041-2047, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.007>
- [50] C.L. Yang, J. McGarrahan, Electrochemical coagulation for textile effluent decolorization. Journal of hazardous materials, 127(1-3), 40-47, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.05.050>
- [51] R. K. Sani, U.C. Banerjee, Decolorization of triphenylmethane dyes and textile and dye-stuff effluent by Kurthia sp. Enzyme and Microbial Technology, 24(7), 433-437, 1999. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.007>







# ÜPMY tabanlı kafes yapılarının SLE yöntemi ile üretiminde boyut hassasiyetinin incelenmesi

## Investigation of dimensional accuracy in the production of TPMS-based lattice structures by SLM method

Erkan Bahçe<sup>1</sup> , Ender Emir<sup>2,\*</sup> , Mehmet Sami Güler<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 44200, Malatya, Türkiye

<sup>2</sup> İstiklal Üniversitesi, Otomotiv Teknolojisi Programı, 46000, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>3</sup> Ordu Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Programı, 52000, Ordu, Türkiye

### Öz

Bu çalışmada CoCr tozundan üretilen üçlü periyodik minimum yüzey (ÜPMY) tabanlı kafes yapılarının seçmeli lazer ergitme (SLE) yöntemi ile üretimindeki boyutsal hassasiyetin incelenmesi amaçlanmıştır. İlkel kafes ve hacim merkezli kübik (HMK) olmak üzere 4x4x4 birim hücre boyutlarında %10 nispi yoğunluklu 2 farklı ÜPMY kafes yapısı kullanıldı. Üretim sonrası boyutsal hassasiyetin değerlendirilebilmesi için her bir numuneden mikroskop ve micro-CT görüntüleri alınmış ve sonlu elemanlar analizi (SEA) ile üretim simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda SLE yöntemi ile ÜPMY bazlı kafes yapılarının üretiminde kütle birikimi, merdiven etkisi ve yapışmış partikül oluşumundan kaynaklı belirgin boyutsal sapmaların meydana geldiği görülmüştür. Tasarlanan kafes yapısı boyutları ile üretim sonucu elde edilen boyutlar incelendiğinde her bir birim kafes yapısının kalınlık değerinin ilkel kafes için %15, HMK kafes için %32 saptığı, genişlik değerinde ise ilkel kafesin %4, HMK kafesin ise %27 saptığı ve son olarak uzunluk değerlerinde ise ilkel kafesin %3, HMK kafesin ise %55 saptığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Eklemeli imalat, Seçmeli lazer ergitme, ÜPMY kafes yapısı, Boyut hassasiyeti

### 1 Giriş

Kafes yapıları; yüksek özgül mukavemet, sertlik, iyi ısı yalıtımı ve enerji absorbe edebilme yeteneği sayesinde günümüzde havacılık, otomotiv, uzay, biyomedikal gibi ürün çıktısı fazla ve maliyetli olan alanlarda tercih edilmektedir [1-6]. 3 boyutlu olarak tasarlanan bu kafes yapıları destek tabanlı, voroni tabanlı, ÜPMY ve topoloji optimizasyon tabanlı olmak üzere 4 gruba ayrılmaktadır [7]. Ancak kafes yapılarının gözenek boyutları ve geometrilerinin çok karmaşık olmasından dolayı üretimlerinde problemler ortaya çıkmaktadır. Özellikle geleneksel imalat yöntemlerinin kafes yapılarının üretiminde yetersiz kalması ile birlikte daha hassas ve hızlı bir üretim yöntemi olan eklemeli imalat (Eİ) yöntemi kullanılmaktadır. Kendi içerisinde 7 gruba ayrılan

### Abstract

In this study, it was aimed to examine the geometric precision of the production of triple periodic minimal surface (TPMS) based lattice structures produced from CoCr powder by SLM method. Two different TPMS lattice structures with 10% relative density of 4x4x4 unit cell sizes, primitive lattice and body centred cubic (BCC), were used. In order to evaluate the dimensional accuracy after production, microscope images and micro-CT were taken from each sample and production was simulated by finite element analysis (FEA). In the results obtained, it was observed that there were significant dimensional deviations due to mass agglomeration, stair effect and bonded particle formation in the production of TPMS-based lattice structures by SLM method. When the dimensions of the designed lattice structure and the dimensions obtained as a result of production are examined, it is seen that the thickness value of each unit lattice structure deviates by 15% for the primitive lattice and 32% for the BCC lattice, while the primitive lattice deviates by 4% and the BCC lattice by 27% in the width value, and finally in the length values. On the other hand, it was determined that the primitive lattice deviated by 3% and the BCC lattice deviated by 55%.

**Keywords:** Additive manufacturing, Selective laser melting, TPMS lattice structure, Dimensional accuracy

eklemeli imalat yöntemleri arasında toz yataklı füzyon (TYF) tekniği ile hassas üretimler gerçekleştirilmektedir [8]. TYF tekniği ise SLE, seçmeli lazer sinterleme (SLS) ve elektron ışınli ergitme (EIE) olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır [8]. Bu yöntemler arasında SLE üretimde sağladığı hassasiyet, yüksek yoğunluk ve ürün dayanıklılığından kaynaklı olarak genellikle tercih edilmektedir [9, 10]. Ayrıca SLE yönteminde üretim malzemesi olarak CoCr, Ti6Al4V ve 316L gibi farklı alaşımların tozları kullanılmaktadır. Bu malzemeler arasında birçok endüstriyel alanda sağladığı yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci nedeni ile CoCr tozu tercih edilmektedir. Özellikle yüksek biyouyumluluk özelliği ile diz ve kalça eklem protezleri başta olmak üzere biyomedikal alanda kullanılmaktadır.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ender.emir@istiklal.edu.tr (E. Emir)

Geliş / Received: 26.11.2021 Kabul / Accepted: 21.01.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1027480

Ancak üretim parametreleri ve üretim esnasında meydana gelen kusurlar oluşturulmak istenen kafes geometrisinin beklenen hassasiyet ve doğruluk düzeyinde üretilmesinde etkili bir rol oynamaktadır. Özellikle bu yöntemde küçük ölçekli parçaların üretiminde toz bileşimi, toz boyutu, tezgâh özellikleri, lazer gücü, tarama hızı, tarama stratejisi parametrelerine bağlı olarak tasarlanan parça ile üretilen parça arasında boyutsal uyumsuzluklar ortaya çıkmaktadır [11, 12]. Belirtilen üretim parametreleri güç kaynağından çıkan lazer ışının eriyik havuzunun boyutlarını da doğrudan etkilemektedir.

Literatürde SLE yöntemi ile üretimde boyutsal hassasiyetin bozulmasında eriyik metal havuzunun boyutlarının değişiminin neden olduğu bazı üretim kusurları belirtilmiştir [13-16]. Bu kusurlardan en önemlileri merdiven etkisi [13], kütle birikimi [14] ve yapışmış partikül [15, 16] oluşum mekanizmalarıdır. Özellikle merdiven etkisi ve yapışmış partikül oluşumu, SLE ile üretimde parçaların üretim doğruluğunu tanımlamada tipik olarak kilit faktörlerdir [17]. Yapışmış partikül mekanizmasının oluşumu lazer, kullanılan toz, çevresel faktörler, katılmış ilk toz katmanı ile bir sonraki serilen toz katmanı arasında meydana gelen fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar gibi toplamda 4 farklı termal ve dinamik durumu içerir [16, 18]. Bunlar katının mekanik, katı hal dönüşümü, termal akışkan dinamiği ve partikül dinamiğidir. Wang vd. [16] sabit tarama hızına karşın farklı lazer güçlerinin yapışmış partikül oluşumu üzerine olan etkilerini araştırmışlar ve lazer gücünün yapışmış partikül oluşumunda etkili bir faktör olduğunu söylemişlerdir.

Merdiven etkisi ise üretilen bileşenlerin boyutsal doğruluğunu etkileyen SLE dahil olmak üzere birçok Eİ yönteminde ortak olan iyi bilinen bir olgudur [19]. Katman bazlı üretim süreci nedeniyle, açılı yüzeyler, katman kalınlığı boyutlu çıkıntılarla imal edilerek, amaçlanan ve imal edilen geometriler arasındaki boyutsal sapmaları arttırmaktadır [13]. Strano vd. [20] çalışmalarında merdiven basamağı etkisi, inşa edilen kafes yapısının nihai boyutlarını etkilediğini rapor etmişlerdir. Diğer yandan SLE işlemi esnasında ortaya çıkan yüksek seviyelerdeki ısının dış ortama atılması esnasında da malzemede meydana gelebilecek çekmeler ve artık termal gerilmeler boyutsal doğruluğu etkilemektedir [12]. Son olarak ise stereolitografi (STL) dosyası olarak oluşturulan CAD modelde üçgen yaklaşımı ile dönüştürme işlemi gerçekleştirdiğinden dolayı küçük miktarlarda sapmalarda meydana gelmektedir [12].

Bu çalışmada SLE yöntemi kullanılarak CoCr tozundan üretilen ÜPMY bazlı kafes yapıları biyomalzemelerin üretiminde karşılaşılan boyutsal sapmaların belirlenebilmesi üzerine bir çalışma sunmak amaçlanmıştır. Çalışmada %10 nispi yoğunluğa sahip ÜPMY bazlı ilkel kafes ve HMK kafes yapıları üretilmiştir. Üretim sonrası boyutsal doğruluğun değerlendirilebilmesi için taramalı elektron mikroskobu (TEM) ve micro-CT ile alınan görüntülerden ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deneysel verilerin desteklenmesi için SLE üretim süreci SEA kullanılarak simüle edilmiştir.

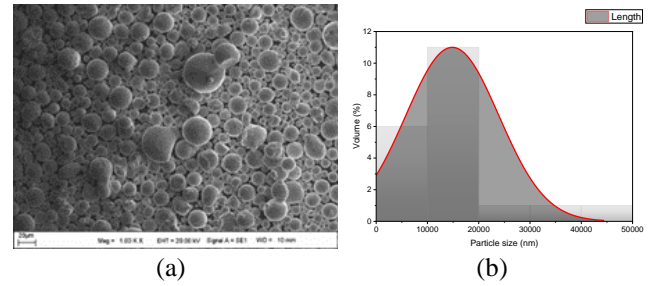
## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Materyal

Bu çalışmada biyomedikal uygulamalarda çoğunlukla tercih edilen kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiş olan CoCr tozu kullanılmıştır. Özellikle metal tozları kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde tozların tane boyutları üretim hassasiyeti açısından önemli bir parametredir. Bu nedenle toz partikül boyutunun değerlendirilebilmesi için CoCr tozundan TEM görüntüsü alınmıştır (Şekil 1a) ve toz partikül boyutu dağılımının ölçümleri yapılmıştır (Şekil 1b).

**Tablo 1.** CoCr toz kimyasal bileşimi [21]

Alaşım	Element içeriği (%)						
	Co	Cr	Mo	W	V	Nb	Fe
Oran(%)	62 ±1	25 ±1	7 ±1	6 ±1	0.2	0.2	0.2 ±0.1



**Şekil 1.** (a) Başlangıç tozlarının TEM görüntüsü (b) CoCr toz partikül boyutu dağılımları

### 2.2 Metod

#### 2.2.1 Kafes yapılarının tasarımı ve üretimi

Çalışmada 4x4x4 birim hücre boyutlarında tasarlanan ÜPMY bazlı ilkel kafes ve HMK kafes yapıları kullanılmıştır. Literatür çalışmalarında ÜPMY bazlı kafes yapılarının tasarlanmasında seviye set denklemleri tanımlanmaktadır [22-24]. Bu nedenle her iki kafes yapısının tasarımı için Denklem (1) ve Denklem (2) verilmiş olan seviye set denklemleri tanımlanmıştır.

$$\Phi_{\text{İkel kafes}} = \cos(kx.x) + \cos(ky.y) + \cos(kz.z) = q \quad (1)$$

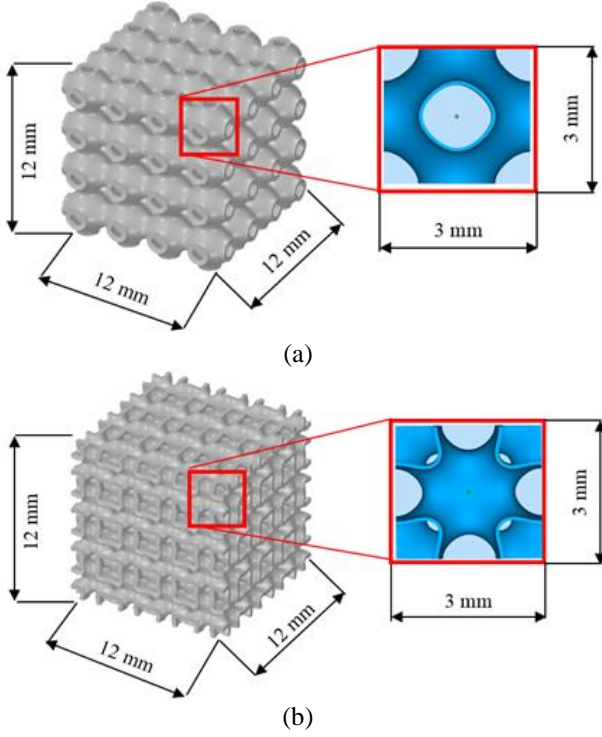
$$\begin{aligned} \Phi_{\text{HMK}} &= \cos(2 * kx.x) + \cos(2.ky.y) \\ &+ \cos(2.kz.z) - (2.(\cos(kx.x). \cos(ky.y) \\ &+ \cos(ky.y). \cos(kz.z) + \cos(kz.z). \cos(kx.x))) = q \end{aligned} \quad (2)$$

Burada her bir numune için kullanılan q parametresi kafes yapılarının gözeneklilik boyutunu belirleyen faktördür [25]. Diğer yandan ki (i=x,y,z) x,y,z yönlerinde birim hücre boyutunu kontrol etmek için kullanılan ÜPMY kafes yapıları için fonksiyonel periyodiklerdir. Bu fonksiyonel periyodikler Denklem (3)’de verildiği gibi ifade edilebilir:

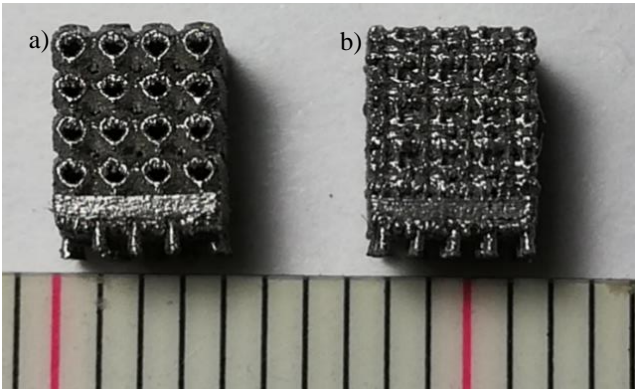
$$ki = 2. \pi. (ni/Li) \quad (3)$$

Burada; ni x,y,z yönlerindeki birim kafes miktarlarıdır. Li ise x, y, z yönlerindeki ni sayıdaki birim hücrelerin mutlak boyutlarıdır. Ek olarak kafes yapısının genel boyutlarının oluşturulması için x, y, z  $\in [-2\pi, 2\pi]$  olarak belirlenmiştir.

Yukarıda verilmiş olan tüm parametreler kullanılarak oluşturulan kafes yapıları CAD modelleri Şekil 2’de verilmiştir. Tasarım aşamasından sonra G kodları oluşturulan kafes yapıları Concept Laser Mlab Cusing marka SLE üretim teknolojisine sahip metal 3D yazıcı kullanılarak üretilmiştir (Şekil 3). Bu yapıların üretimi için SLE işleme parametreleri 100 W lazer gücü, 1200 mm/s tarama hızı, 30 µm katman kalınlığı olarak seçilmiştir.



Şekil 2. ÜPMY kafes yapıları; (a) ilkel kafes, (b) HMK

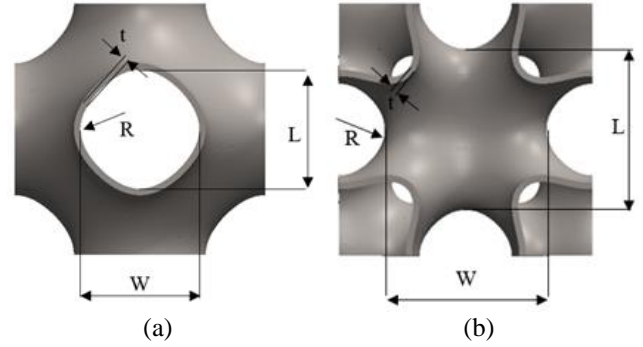


Şekil 3. SLE yöntemi ile üretilen kafes yapıları; (a) ilkel kafes, (b) HMK

### 2.2.2 Boyutsal sapmaların ölçüm stratejisi

Çalışmanın bu aşamasında mikroskop görüntülerinin CAD model ile karşılaştırılabilmesi için öncelikli olarak Şekil 4a-4b’de gösterildiği gibi birim hücrelerin boyutları belirlenmiştir. Ölçümler alınırken her bir birim hücrenin gözeneklerinin genişliği (W), uzunluğu (L), radyus (R) ve kalınlık (t) değerleri dikkate alınmıştır. Tablo 2’de birim hücrelerin boyutları verilmiştir. Alınan ölçümler sonucunda

ortalama değerler hesaplanmıştır. Son aşamada HMK ve ilkel kafes yapılarının her biri için CAD model ve mikroskop görüntüleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca kafes yapısında meydana gelen pozitif ve negatif sapmaların 3 boyutlu olarak ölçülebilmesi için her iki kafes yapısından micro-CT görüntüleri alınarak CAD model ile karşılaştırılmıştır.



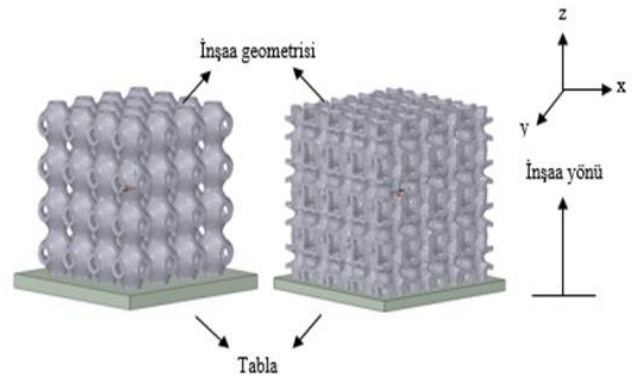
Şekil 4. Birim hücre boyutları; (a) ilkel kafes, (b) HMK

Tablo 2. Birim hücre boyutları

	İlkel kafes	HMK
Radyus (R)	0.415	0.475
Kalınlık (t)	0.3	0.3
Genişlik (W)	1.071	1.21
Uzunluk (L)	1.071	1.21

### 2.2.3 Sonlu elemanlar modeli

SLE yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde nihai ürünlerde meydana gelen ısı boyutsal hassasiyeti büyük ölçüde etkilemektedir. Özellikle üretilen geometri ile inşa edilen tabla ve dış ortama belirli bir miktar ısı transferi meydana gelmektedir. Ancak belirtilen parametrelerin ölçümü deneysel çalışmalar ile hem zaman almakta hem de maliyetli olmaktadır. Bu nedenle üretim anındaki ısı transfer oluşumu ve deformasyon büyüklüklerinin belirlenmesi için sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Böylece üretim süreçleri simüle edilerek SLE yöntemi ile üretimde meydana gelen ısı gerilmeler ve buna bağlı olarak oluşan deformasyon bölgeleri ve büyüklükleri elde edilmiştir. Şekil 5’de eklemeli imalat simülasyonunun oluşturulmasında kullanılan 4x4x4’lik kafes yapıları, taban plakaları ve inşa yönü görülmektedir.



Şekil 5. SEA eklemeli imalat prosesi



### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 SLE üretim hassasiyeti

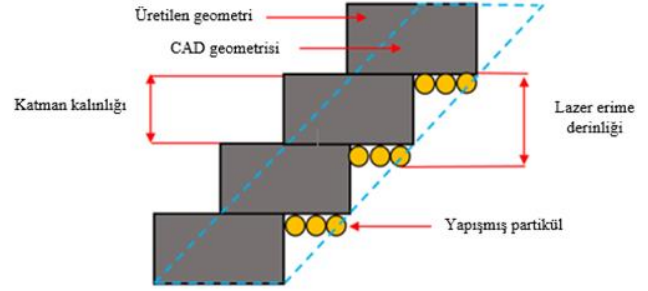
Bu bölümde ilkel kafes ve HMK birim hücrelerinde meydana gelen boyutsal sapma büyüklüklerinin tespiti için alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde her bir birim hücrede kalınlık, genişlik ve uzunluk ölçülerinde belirgin farklılıkların meydana geldiği görülmüştür. Tablo 3’de her iki birim hücrenin kalınlık, genişlik, uzunluk ve radyus değerlerinde meydana gelen boyutsal sapmaların ortalama değerleri verilmiştir. Kalınlık ölçümleri sonucunda ilkel kafes birim hücrede kalınlığın CAD model verisinden (0,3 mm) ortalama %15 saptığı, HMK birim hücrede ise olması gereken kalınlık değerinden (0,3 mm) ortalama %32 saptığı tespit edilmiştir. Genişlik bakımından ise ilkel kafes birim hücrede ortalama %4 sapma, HMK birim hücrede ise ortalama %27 sapma değeri ölçülmüştür. Son olarak her iki birim hücrenin uzunluk ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında ise ilkel kafes birim hücrede %3 sapma, HMK birim hücrede ise %55 sapma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

**Tablo 3.** Birim hücre ortalama boyut ölçüm değerleri

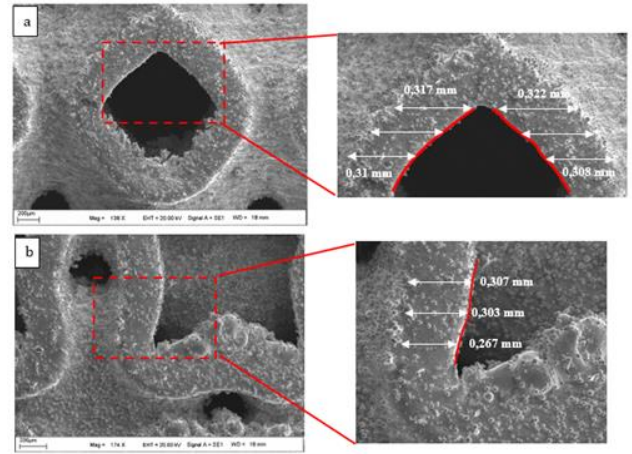
		Kalınlık (t) (mm)	Genişlik (W) (mm)	Uzunluk (L) (mm)	Radyus (R) (mm)
İlkel kafes	CAD	0.3	1.071	1.071	0.415
	DeneySEL	0.345	1.120	1.103	0.341
HMK	CAD	0.3	1.21	1.21	0.475
	DeneySEL	0.398	0.893	0.665	0.16

Birim hücrelerin kalınlık ölçülerindeki sapmaların temelinde merdiven etkisi adı verilen SLE yöntemi ile üretimde sıklıkla karşılaşılan oluşum gelmektedir. Şekil 6’da merdiven etkisinin oluşumunun şematik olarak gösterimi verilmiştir. Bu durumun oluşumundaki temel sebep üretim esnasında katman kalınlığı ile lazer eriyik derinliğinin birbirinden farklı olmasından kaynaklıdır. Lazer eriyik derinliğinin fazla olması ile birlikte lazer ışınlarının etki ettiği alanda yatay mesafede artmaktadır [15]. Böylece eğimli yüzeylerin üretiminde yatay bölgedeki eriyik tozları CAD model verisine göre daha fazla alana yayılmakta ve sonuç olarak inşa yönünde giderek artan çıkıntı yapılarının oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle bu oluşum mekanizmasında eğimli yüzeylerin üretiminde her bir katmanın üzerine yeni bir katman inşa edildiği zaman katman kalınlığı boyutlu çıkıntılarla üretime sebep olmaktadır. İlkel kafes ve HMK birim hücrede eğimli yüzeyler incelendiğinde kalınlık ölçümleri inşa yönünde giderek artış göstermiştir (Şekil 7). Kalınlık ölçüm sonuçları ilkel kafeste 0.3 mm olması gereken kalınlık değeri merdiven etkisinin oluşumu ile birlikte minimum 0.308 mm, maksimum 0.322 mm değerine kadar çıktığı görülmüştür. Diğer yandan HMK birim hücrede ise minimum 0.267 mm iken maksimum 0.307 mm değerleri ölçülmüştür. Nitekim literatür çalışmaları incelendiğinde de SLE yöntemi ile üretimde eğimli yüzeylerin üretiminde merdiven etkisinin

oluşumu yönünde çalışmalar elde edilen sonuçları destekler niteliktedir [19].



**Şekil 6.** Merdiven etkisi oluşumunun şematik gösterimi



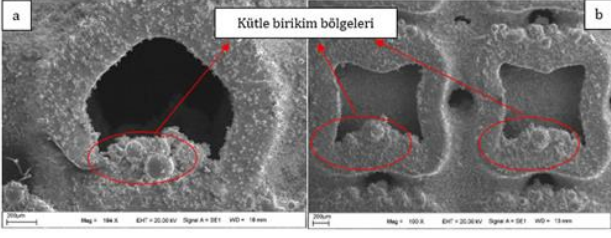
**Şekil 7.** Merdiven etkisi oluşumu; (a) ilkel kafes, (b) HMK

Ayrıca birim hücrelerin radyusa sahip bölgelerinde de boyutsal sapmaların meydana geldiği net bir şekilde görülmüştür. Tablo 3’de yer alan veriler incelendiğinde ilkel kafes birim hücrenin radyus değerinin CAD model verisine göre %18 sapma meydana geldiği, HMK birim hücrede ise CAD model verisinden %33 sapma olduğu tespit edilmiştir. Bu durum birim hücrenin inşa yönüne göre alt kısımlarda kalan kütle birikmesi olarak adlandırılan ve metal malzemelerin SLE yöntemi ile üretiminde sıklıkla karşılaşılan eklemeli imalatta boyutsal hassasiyeti etkileyen bir yapıdan kaynaklanmaktadır. Nitekim Şekil 8’de verilmiş olan görüntülerde de belirgin şekilde kütle birikimi oluşumu gözlemlenmiştir. Bu üretim kusurunun oluşmasında iki farklı neden vardır. Bunlardan birincisi nano boyutta bulunan CoCr tozlarının yüzey enerjileri fazla olması nedeni ile toz partikülleri yüzey enerjilerini azaltmak için bir araya gelmesidir [14]. Diğer neden ise toz partikülleri arasındaki Van der Waals ve Coulomb kuvveti birikim oluşumunu sağlayan kuvvetlerdir [14].

Ayrıca birim hücrede meydana gelen boyutsal sapmaların oluşumu ve büyüklüklerinin yorumlanabilmesi için Şekil 9’da verilen SEA ile incelenmiştir. Analiz sonuçları inşa yönüne bağlı ve inşa yönünden bağımsız olarak değerlendirilmiştir. Şekil 9a ve Şekil 9b’de verilen ilkel kafes birim hücrede inşa yönünde ve inşa yönünden

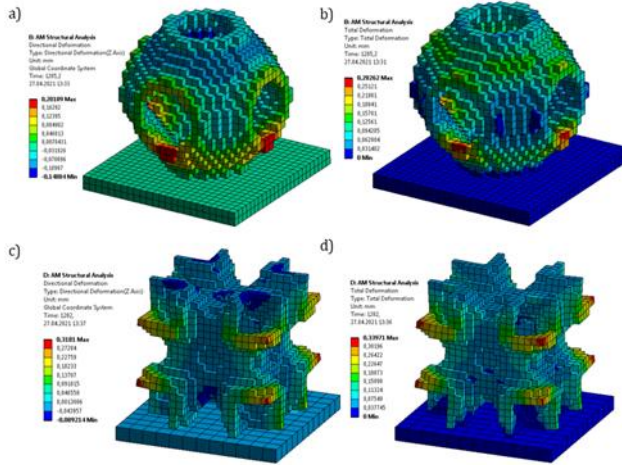


bağımsız meydana gelen deformasyon büyüklüklerinin gösteren SEA sonuçları verilmiştir.



Şekil 8. Birim hücrede meydana gelen geometrik sapma alanları; (a) ilkel kafes, (b) HMK

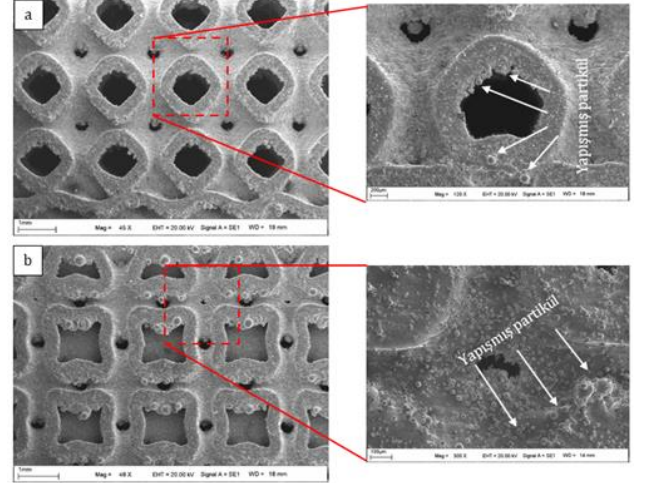
Sonuçlar incelendiğinde ilkel kafes birim hücrede +z eksenini boyunca maksimum deformasyon büyüklüğü 0.20189 mm iken toplam deformasyon büyüklüğü ise 0.28262 mm iken; HMK birim hücrede ise +z eksenini boyunca maksimum deformasyon büyüklüğü 0.3181 mm iken toplam deformasyon büyüklüğü ise 0.33971 mm olduğu görülmüştür (Şekil 9c, Şekil 9d). Özellikle SEA sonuçlarında verilmiş olan renk skalası incelendiğinde maksimum deformasyona bölgelerinin deneysel çalışma ile elde edilen deformasyon bölgeleri ile benzer sonuçlar sergilediği tespit edilmiştir.



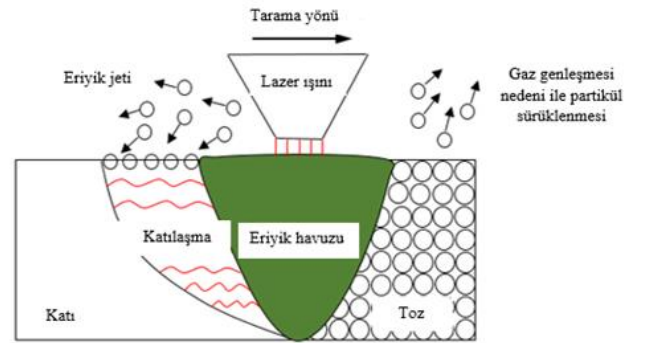
Şekil 9. Üretim esnasında meydana gelen deformasyon büyüklüklerinin FE sonuçları; (a) ilkel kafes birim hücrenin z yönündeki deformasyon miktarı, (b) ilkel kafes birim hücrenin toplam deformasyon miktarı, (c) HMK birim hücrenin z yönündeki deformasyon miktarı, (d) HMK birim hücrenin toplam deformasyon miktarı

Şekil 10'da ilkel kafes ve HMK kafes yapıları için verilmiş olan TEM görüntülerinde de belirgin bir şekilde yapışmış toz partiküllerinin oluşumuna rastlanmıştır. Bu mekanizmanın oluşumuna sebep olan eriyik havuzunun termodinamik, dinamik ve metalürjik yönden kararsızlığı sonucu üretim esnasında meydana gelen birkaç durum vardır [26]. Bunlardan birincisi üretim için oluşturulan eriyik havuzunu genişliği ve derinliğinin CAD model boyutlarına göre daima fazla olmasıdır [15, 27]. İkincisi ise lazer ışını ile tozların taranması anında yüzeylere oluşan yüksek ısı ile

birlikte nispeten erimiş olan toz partikülleri bağlanmaktadır [15]. Nitekim Şekil 11'de SLE yöntemi ile üretim esnasında meydana gelen termal ve dinamik olayların değişimi şematik olarak verilmiştir. Bağlanan bu toz partikülleri bir sonraki serilen toz katmanının üzerine düşen lazer ışının etkisi ile meydana gelen ısı transferi sonucunda soğuma ile yapışmaya neden olmaktadır. Son olarak ise lazer tarama yönünde gaz genişlemesi nedeni ile partikül sürüklenmesi olayı gerçekleşmektedir. Bu olay sonucunda üretim alanında toz partikülleri savrulurken kısmen katılaşmaya başlamış yüzeylerin üzerine yapışmaktadır.

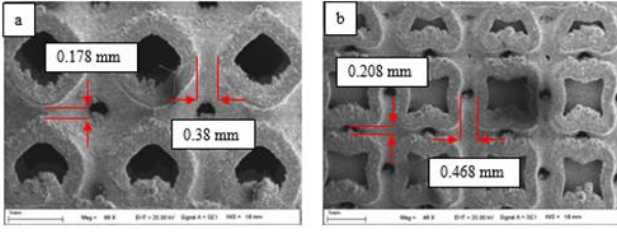


Şekil 10. Yapışmış partikül oluşumu; (a) ilkel kafes, (b) HMK



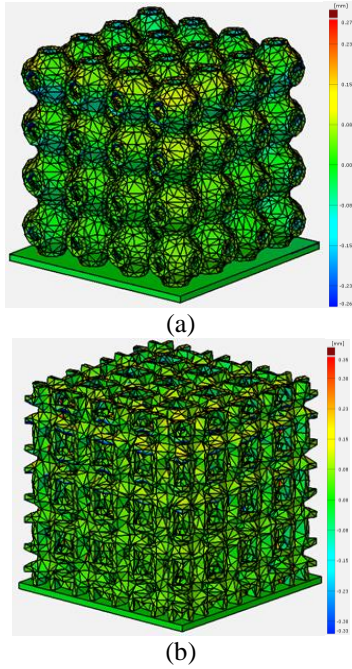
Şekil 11. SLE üretim süreci

Diğer yandan birim hücrelerdeki boyutsal sapmalara karşılık tüm kafes yapısının da belirgin bir şekilde etkilendiği görülmüştür. Özellikle birbiri ile komşu olan birim hücrelerin arasındaki yatay ve dikey mesafelerde sapmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 12'de verilen görüntüler incelendiğinde ilkel kafes yapısında her bir birim hücre arasındaki ortalama dikey mesafe CAD model verisinden (0,3 mm) ortalama %59.33 sapma, yatay mesafelerde ise CAD model verisinden (0,3 mm) ortalama %26 sapma tespit edilmiştir. HMK kafes yapısında ise her bir birim hücre arasındaki ortalama dikey mesafe CAD model verisinden (0,3 mm) ortalama %56.33 sapma, yatay mesafelerde ise CAD model verisinden (0,3 mm) ortalama %69.33 sapma meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 12. Komşu hücreler arası yatay ve dikey mesafe farklılıkları; (a) ilkel kafes, (b) HMK

Şekil 13’de SLE yöntemi ile üretimde meydana gelen boyutsal sapmaların 3 boyutlu tespiti için üst üste bindirilen micro-CT ve CAD model görüntüleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda boyutsal sapmaların ilkel kafes yapısında nominal değerden +0.27/-0.26 mm saptığı, HMK kafes yapısında ise +0.35/-0.33 mm saptığı görülmüştür. İnşa yönünde giderek artan ısı birikimi nedeni ile her iki kafes yapısında da meydana gelen sapmalarda da artış gözlemlenmiştir. Meydana gelen ısının kontrollü bir şekilde transfer edilememesi eriyik havuzunda giderek artan şekilde yapışmış partikül oluşumuna sebep olur. Ayrıca 2 boyutlu ölçümlerde merdiven etkisi ve kütle birikimi nedeni ile meydana gelen boyutsal sapmalar 3 boyutlu ölçümler sonucunda elde edilen değerler ile desteklenmiştir.



Şekil 13. Boyutsal sapmaların 3 boyutlu gösterimi; (a) ilkel kafes, (b) HMK

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada CAD ortamında tasarlanmış %10 nispi yoğunluğa sahip ÜPMY bazlı ilkel kafes ve HMK kafes yapıları SLE yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Çalışmadaki temel amaç SLE yöntemi ile üretimde ÜPMY bazlı ilkel kafes ve HMK kafes yapılarının üretim sonrası geometrik hassasiyetlerini karşılamaktır. Bu çalışmadan elde edilen başlıca bulgular ve sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Elde edilen sonuçlarda geometrik hassasiyetin tasarlanan CAD modeli ile üretilen kafes yapısı arasında belirgin bir şekilde farkların oluşumu gözlemlenmiştir.

2. Birim hücrelerin boyutları incelendiğinde genişlik ve kalınlığın kütle birikimi ve merdiven etkisi kaynaklı oluşumu ile meydana geldiği tespit edilmiştir.

3. Üretim esnasında meydana gelen ısı geçişleri ve buna bağlı olarak oluşan yapışmış partikül mekanizması ile birim hücrenin uzunluk ölçülerinde belirgin farklılıklar tespit edilmiştir.

4. Üretim sürecinde inşa yönünde meydana gelen deformasyon büyüklükleri ve toplam meydana gelen deformasyon büyüklükleri için gerçekleştirilen SEA sonuçlarında da deneysel elde edilen büyüklüklerde ve bölgelerde sonuçlar birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür.

5. Micro-CT ölçümleri ile incelenen 3 boyutlu sapmaların merdiven etkisi, kütle birikimi ve yapışmış partikül oluşumu ile ilişkili olduğu sonucu desteklenmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %9

#### Kaynaklar

- [1] J. Zhang, B. Song, L. Yang, R. Liu, L. Zhang and Y. Shi, Microstructure evolution and mechanical properties of TiB/Ti6Al4V gradient-material lattice structure fabricated by laser powder bed fusion. *Composites Part B: Engineering*, 202, 108417, 2020. doi:10.1016/j.compositesb.2020.108417.
- [2] L. Zhang, B. Song, J. J. Fu, S. S. Wei, L. Yang, C. Z. Yan and Y. S. Shi, Topology-optimized lattice structures with simultaneously high stiffness and light weight fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and characterization. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1166–1177, 2020. https://doi:10.1016/j.jmapro.2020.06.005.
- [3] S. Yin, H. Chen, Y. Wu, Y. Y. Li and J. Xu, Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood. *Composite Structures*, 201, 131–140, 2018. https://doi:10.1016/j.compstruct.2018.06.038.
- [4] J. Parthasarathy, B. Starly and S. Raman, A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 13(2), 160–170, 2011. https://doi:10.1016/j.jmapro.2011.01.004.
- [5] A. Gupta and M. Talha, Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 79, 1–14, 2015. https://doi:10.1016/j.paerosci.2015.07.001.
- [6] C. Pan, Y. Han and J. Lu, Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Applied Science*, 10,6374, 2020. https://doi:10.3390/app10186374.
- [7] C. H. P. Nguyen, Y. Kim and Y. Choi, Design for Additive Manufacturing of Functionally Graded Lattice Structures: A Design Method with Process Induced Anisotropy Consideration. *International*



- Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 8(1), 29-45, 2019. <https://doi:10.1007/s40684-019-00173-7>.
- [8] D. Mahmoud and M. Elbestawi, Lattice Structures and Functionally Graded Materials Applications in Additive Manufacturing of Orthopedic Implants: A Review. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 1(2), 13, 2017. <https://doi:10.3390/jmmp1020013>.
- [9] A. Alghamdi, T. Maconachie, D. Downing, M. Brandt, M. Qian and M. Leary, Effect of additive manufactured lattice defects on mechanical properties: an automated method for the enhancement of lattice geometry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 108(3), 957-971, 2020. <https://doi:10.1007/s00170-020-05394-8>.
- [10] L. Jiao, Z. Chua, S. Moon, J. Song, G. Bi and H. Zheng, Femtosecond Laser Produced Hydrophobic Hierarchical Structures on Additive Manufacturing Parts. Nanomaterials, 8(8), 601 2018. <https://doi:10.3390/nano8080601>.
- [11] Z. S. Bagheri, D. Melancon, L. Liu, R. B. Johnston and D. Pasini, Compensation strategy to reduce geometry and mechanics mismatches in porous biomaterials built with Selective Laser Melting. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 70, 17–27, 2017. <https://doi:10.1016/j.jmbbm.2016.04.041>.
- [12] J. Kozak and Zakrzewski, Accuracy problems of additive manufacturing using SLS/SLM processes, 020010, 1-12, 2018. <https://doi:10.1063/1.5056273>.
- [13] T. Maconachie, M. Leary, B. Lozanovski, X. Zhang, M. Qian, O. Faruque and M. Brandt, SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges. Materials & Design, 108137, 2019. <https://doi:10.1016/j.matdes.2019.108137>.
- [14] W. Zhai, W. Zhou, L. M. S. Nai and J. Wei, Characterization of nanoparticle mixed 316 L powder for additive manufacturing. Journal of Materials Science & Technology, 47, 162–168, 2020. <https://doi:10.1016/j.jmst.2020.02.019>.
- [15] S. L. Sing, F. E. Wiria and W. Y. Yeong, Selective laser melting of lattice structures: A statistical approach to manufacturability and mechanical behavior. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 49, 170–180, 2018. <https://doi:10.1016/j.rcim.2017.06.006>.
- [16] D. Wang, S. Wu, F. Fu, S. Mai, Y. Yang, Y. Liu and C. Song, Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. Materials & Design, 117, 121–130, 2017. <https://doi:10.1016/j.matdes.2016.12.060>.
- [17] L. Yang, M. Ferrucci, R. Mertens, W. Dewulf, C. Yan, Y. Shi and S. Yang, An investigation into the effect of gradients on the manufacturing fidelity of triply periodic minimal surface structures with graded density fabricated by selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology, 116367, 2019. <https://doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116367>.
- [18] J. P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, and T. H. C. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. CIRP Annals, 56(2), 730–759, 2007. <https://doi:10.1016/j.cirp.2007.10.004>.
- [19] M. A. Isa and I. Lazoglu, Five-axis additive manufacturing of freeform models through buildup of transition layers, Journal of Manufacturing System, 50, 69-80, 2019. <https://doi:10.1016/j.jmsy.2018.12.002>.
- [20] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, and K. E. Evans, Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. J. Mater. Process. Technol. 213, 589-597, 2013. <https://doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.11.011>.
- [21] M. V. Mergulhão, C. E. Podestá and M. D. M. das Neves, Mechanical Properties and Microstructural Characterization of Cobalt-Chromium (CoCr) Obtained by Casting and Selective Laser Melting (SLM). Materials Science Forum, 899, 534–539, 2017. <https://doi:10.4028/www.scientific.net/msf.899.534>.
- [22] M. Zhao, F. Liu, G. Fu, D. Zhang, T. Zhang and H. Zhou, Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM. Materials, 11(12), 2411, 2018. <https://doi:10.3390/ma11122411>.
- [23] O. Al-Ketan and R. K. Abu Al-Rub, Multifunctional mechanical-metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices: A review. Advanced Engineering Materials, 21(10), 2019. <https://doi:10.1002/adem.201900524>.
- [24] L. Y. Zhu, L. Li, J. P. Shi, Z. A. Li and J. Q. Yang, Mechanical characterization of 3D printed multi-morphology porous Ti6Al4V scaffolds based on triply periodic minimal surface architectures. American journal of translational research, 10(11), 3443–3454, 2018.
- [25] N. Yang, Z. Quan, D. Zhang and Y. Tian, Multi-morphology transition hybridization CAD design of minimal surface porous structures for use in tissue engineering. Computer-Aided Design, 56, 11–21, 2014. <https://doi:10.1016/j.cad.2014.06.006>.
- [26] C. Körner, A. Bauereiß and E. Attar, Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 21(8), 085011, 2013. <https://doi:10.1088/0965-0393/21/8/085011>.
- [27] S. Van Bael, G. Kerckhofs, M. Moesen, G. Pyka, J. Schrooten and J. P. Kruth, Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures. Materials Science and Engineering: A, 528(24), 7423–7431, 2011. <https://doi:10.1016/j.msea.2011.06.04>





# AISI 304 paslanmaz çelik talaşlı şekil verme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimini azaltmaya yönelik istatistiksel yaklaşım

## Statistical approach to reducing the surface roughness and power consumption in machining of AISI 304 stainless steel

Mehmet Safa Bodur<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Yeditepe Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, 34755, İstanbul, Türkiye

### Öz

İmalat sanayinde talaşlı şekil verme tekniği önemli bir yer tutmaktadır. Plastik şekil verme, döküm ve birleştirme teknikleri gibi geleneksel şekillendirme tekniklerinden farklı olarak, talaşlı şekil vermede iyi bir yüzey kalitesi elde etmek kritiktir. Yüzey kalitesinin yanı sıra düşük maliyetler ile işleme gereksinimi nedeniyle güç tüketimi, işleme maliyetlerinde önemli bir kalem olarak karşımıza çıkmaktadır. Hem yüzey kalitesi hem de güç tüketimi talaşlı işleme esnasında birçok parametreden etkilenebilir. Bu doğrultuda ideal parametre ve seviyelerde talaşlı imalat yapabilmek önemlidir. Çalışmada, birçok uygulama alanına sahip AISI -304 paslanmaz çeliğin soğutma sıvısı kullanıldığı şartlar altında tornalanması esnasında ilerleme miktarı (F), kesme hızı (V<sub>c</sub>) ve paso miktarının (d) yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimi açısından farklı seviyelerdeki etkisi istatistiksel analizler kullanılarak incelenmiştir. Aynı zamanda matematiksel modeller oluşturularak deneysel veriler ile sonuçlar kıyaslanmıştır. Yürütülen deneysel ve istatistiksel yaklaşımlar bize ilerleme miktarının yüzey kalitesi açısından çok etkili olduğunu ve güç tüketimi açısından ise her üç parametrenin de önemli olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Optimizasyon, Tornalama, AISI 304 paslanmaz çelik, İstatistiksel yaklaşım

### 1 Giriş

Geçmişten günümüze birçok çalışmaya konu olmuş talaş kaldırma işlemleri neredeyse tüm ürünlerin imalat süreçlerinde tercih edilmektedir. [1, 2]. Tornalama, frezeleme, delik delme, borlama gibi iş parçasından malzeme kaldırarak şekillendirme yapılan birçok geleneksel yöntem yıllardır kullanılmaktadır. Bahsi geçen talaş kaldırma teknikleri arasında tornalama işlemi düşük maliyetlerin ve yüksek üretim hızlarının öncelikli olduğu imalat endüstrisinde önemli bir yer almaktadır [3]. Oldukça rekabetçi bir ortama sahip olan imalat endüstrisinde iş parçalarının uygun işlem parametreleriyle işlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Dolayısıyla imalat endüstrisinin bu ihtiyacına yönelik olarak akademik çevreler çalışmalarında talaşlı şekil verme işlemlerinde en ideal işlem parametrelerini bulmaya odaklanmışlardır. Tornalama işlemi genel olarak silindirik iş parçalarının çaplarını

### Abstract

Machining technique has an important place in the manufacturing industry. Unlike traditional forming techniques such as plastic forming, casting and welding techniques, it is critical to achieve relatively better surface quality in machining. In addition to surface quality, power consumption is an important concern in processing costs due to the need for processing with low costs. Both surface quality and power consumption can be affected by many parameters during machining. In this direction, it is important to be able to produce machining at ideal parameters and levels. In this study, the effects of feed rate (F), cutting speed (V<sub>c</sub>) and depth of cut (d) at different levels during turning of AISI -304 stainless steel, which has many application areas, under the conditions of using coolant, were investigated using statistical analyzes. At the same time, mathematical models were created and results were compared with experimental data. Experimental and statistical approaches have shown us that the feed rate is very effective in terms of surface quality while all three parameters are important in terms of power consumption.

**Keywords:** Optimization, Turning, AISI 304 stainless steel, Statistical approach

düşürmek, istenilen boyutlara ulaştırmak ve iyi bir yüzey kalitesine sahip olmalarını sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Talaşlı şekil verme işlemlerinde iyi bir yüzey kalitesi daima aranmaktadır. Genel anlamda yüzey kalitesini etkileyen üç ana etki vardır. Bu faktörler, ilerleme miktarı (F), kesme hızı (V<sub>c</sub>) ve kesme derinliği / paso miktarı' dır (d).

Literatürde farklı malzemelerin talaşlı şekillendirilmesine ve optimizasyonuna yönelik olarak birçok çalışma yürütülmektedir. Kaladhar ve arkadaşları AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin tornalanması ve ideal parametrelerin talaş kaldırma miktarı açısından belirlenmesine yönelik çalışmayı yürütmüşlerdir. Sonuçlar paso ve ilerleme miktarının en etkin parametreler olduğunu göstermiştir [4]. AISI 304 paslanmaz çeliği üzerine yapılan bir diğer çalışmada ise farklı kesme sıvılarının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. Anthony ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmadaki ANOVA

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmet.bodur@yeditepe.edu.tr (M. S. Bodur)  
Geliş / Received: 07.01.2022 Kabul / Accepted: 02.02.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1054913



analizleri, yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkili parametrenin %61 katkı oranı ile ilerleme miktarının olduğunu göstermiştir. Ayrıca takım aşınması açısından ise %46 katkı oranı ile kesme hızının etkisinin en yüksek olduğu anlaşılmıştır [5]. 2011 yılında Aouici ve arkadaşları, AISI H 11 çeliğinin tormalanması sırasında takım aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün farklı parametrelerden nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. Çalışmada, ilerleme miktarını yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça etkili olduğu anlaşılmıştır [6]. Şahin ve arkadaşlarının ilerleme miktarının AISI 1050 çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde de oldukça etkili olduğu ortaya çıktı. Ayrıca kesme hızı, ilerleme miktarı ve paso miktarı azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı sonucuna varılmıştır [7]. Kesme parametrelerinin etkilerinin incelendiği bir başka çalışmada, yüzey pürüzlülüğü üzerinde üç ana faktörün yanı sıra kesici takım açılarının da etkili olduğu anlaşılmıştır [8]. Farklı malzeme grupları üzerine yapılan çalışmalar da benzer parametrelerin yüzey kalitesini etkilediğini göstermektedir [9-13]. Talaşlı şekil verme işlemlerinde dikkat edilmesi gereken diğer önemli nokta ise düşük güç tüketimidir. Çünkü yapılan çalışmalar, endüstriyel elektriğin yaklaşık %75'inin tezgahlar tarafından tüketildiğini göstermektedir [14]. Fernando ve arkadaşları AISI P20 malzemesi üzerine yürüttüğü çalışmada kesme parametrelerinin yanı sıra kesme sıvısının güç tüketimi, yüzey pürüzlülüğü ve çevresel etkiler üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada kesme hızının çevresel etki açısından en etkili parametre olduğu diğer yandan ilerleme ve paso miktarının ise etkilerinin göz ardı edilebilir seviyede olduğu görülmüştür. Güç tüketimi açısından ise kesme sıvısının kullanılmasının oldukça etkili olduğu görülmüştür [15]. AISI 1040 çeliği üzerine yürütülen bir çalışmada ise kuru ve ıslak talaşlı şekil verme şartlarında farklı kesme parametrelerinin güç tüketimi, takım aşınması ve oluşan sıcaklık değerleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Kesme sıvısı kullanımının güç tüketimi üzerine %94 etkili olduğu ayrıca düşük kesme hızı ve ilerleme miktarının düşük güç tüketimi için tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [16].

Talaşlı şekil verme işlemlerinde en ideal işleme parametrelerinin bulunabilmesi için istatistiksel analiz en tercih edilen yöntemlerden bir tanesidir. Bu yöntem ile birlikte hangi parametrelerin ve seviyelerinin talaşlı işleme esnasında malzeme özelliklerini nasıl etkilediğini ve hangi faktörün/seviyenin en verimli olduğu farklı bir bakış açısıyla yorumlanabilmektedir. Roopa ve arkadaşlarının 2015 yılında EN 19 çeliğinin tormalanması esnasında kesme hızı, ilerleme ve paso miktarının yanı sıra ısı işlemlerin yüzey kalitesi ve talaş kaldırma miktarı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada farklı parametreler ve seviyeler kullanarak en etkili parametreleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) de yapılmıştır. Gerçekleştirilen ANOVA analizi sonucunda kesme hızının %63 oranında en etkili parametre olduğu anlaşılmıştır [17].

Orta karbonlu çeliklerin işlenmesinde kesme hızı, ilerleme ve paso miktarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri Ajit ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Çalışmada yüksek hızlı tormalama koşulları tartışılmış ve sonuçlar ANOVA analizi ile desteklenmiştir. Bu çalışmada

paso miktarının en etkili faktör olduğu ve kesme hızının ise en az etkili faktör olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca matematiksel modeller geliştirilmiş ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır [18]. Vijaykumar ve ark. Kesme parametrelerinin sertleştirilmiş AISI 52100 çeliği üzerindeki etkileri talaş kaldırma oranı esas alınarak araştırılmıştır. Ortaya çıkan sonuçları yorumlamak amacıyla ANOVA analizinden faydalanılmıştır. Çalışma sonunda kesme hızı, paso ve ilerleme miktarının etkilerinin sırasıyla %28.33, %24.3 ve %19.55 olduğu bulunmuştur [19]. Benzer şekilde, birçok çalışmada farklı malzemelerin işlenmesine yönelik ANOVA analizleri yapılmıştır [20-25].

Bu çalışma, AISI 304 paslanmaz çeliğin boraks yağı kullanılarak tormalama işleminde kesme hızı, ilerleme ve paso miktarının yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimi üzerindeki etkilerini deneysel veriler ışığında istatistiksel analizlerden faydalanarak yorumlama yapmak, belirlenen seviyeler arasında ideal olanları ortaya koymak ve oluşturulan matematiksel modellerin uygunluklarını araştırmak amacıyla yürütülmüştür. İlk olarak numuneler çeşitli kesme parametreleri kullanılarak işlenmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiş ve tormalama işlemi esnasındaki akım değerleri ölçülmüştür. Deneysel olarak bulunan sonuçlara ait ANOVA analizleri yapılmış ve sonuçları yorumlanmıştır. Ayrıca oluşan talaş türleri de optik mikroskop altında incelenmiştir. Çalışma sonunda minimum yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimi için gerekli olan parametreleri belirlenerek matematiksel modeller oluşturulmuştur.

## 2 Deneysel metod

Çalışma kapsamında 26 mm çapında ve 150 mm uzunluğunda AISI 304 paslanmaz çelik çubuklar kullanılmıştır. İş parçaları Yıldızay Paslanmaz Çelik ve Metal ürünleri Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Kimyasal bileşeni ve mekanik özellikleri Tablo 1 ve 2'de sırasıyla verilmektedir.

ISCAR tarafından üretilen DNMG 150608-PP, IC907 kodlu kesici takım kullanılmıştır. Takımın burnun çapı 0.8 mm'dir. Çalışmada Takisawa Corporation firmasına ait SP-TB5M universal CNC torna tezgahı kullanılmıştır ve talaş kaldırma esnasında soğutucu akışkan olarak boraks yağı tercih edilmiştir. İşlem sonunda talaşlar incelenmek üzere CNC torna tezgahında toplanmıştır.

**Tablo 1.** AISI 304 kimyasal bileşenleri

%C	%Mn	%Si	%P	%Cr	%Ni	%Cu	%Mo	%Co	%N <sub>2</sub>
0.02	1.63	0.37	0.034	18.2	8.02	0.75	0.33	0.14	0.027

**Tablo 2.** AISI 304 özellikleri

Sertlik [BHN]	204.0
% Alan daralması	71.0
% Birim şekil değişimi	43.0
Çekme dayanımı [MPa]	689.0
0.2 % Akma dayanımı [MPa]	537.0

Test numuneleri üzerinde Mitutoyo SJ-210P profilometre cihazı kullanılarak yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır (Şekil 1a). Test numunelerinin yüzeyleri

ölçümden önce temizlenmiş ve her numune için beş farklı bölgede ölçümler yapılmış olup sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır.



Şekil 1. (a)Profilometre (SJ-210 P) (b) Dijital pensampermetre (Dt 266)

Tornalama esnasında enerji tüketimini hesaplayabilmek amacıyla gerekli olan akımı ölçebilmek amacıyla Dt 266c pensampermetre (Şekil 1b) tercih edilmiştir. Güç tüketim değerleri, deneysel olarak ölçülen ortalama akım değerleri kullanılarak Denklem (1) ile hesaplanmıştır.

$$P = \frac{I \times U}{1000} \quad (1)$$

Burada;

P: Güç Tüketimi [kW]

I: Tornalama esnasında ölçülen akım [A]

U: Voltaj [Volt]

Çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliğinin tornalama işlemi esnasındaki etkilerini incelemek amacıyla kesme hızı, paso ve ilerleme miktarları farklı seviyelerde incelenmiştir. Bu amaçla her parametrenin etkisini belirlemek için toplamda 27 farklı yüzey tornalanmıştır. Kesme parametrelerinin seçiminde kesici takım üreticisinin önerdiği ideal kesme parametreleri dikkate alınmıştır. İşleme parametreleri Tablo 3'te görülebilmektedir.

Tablo 3. Deneysel parametreler

Parametre	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme Hızı (V <sub>c</sub> )	m/dk.	100	125	150
İlerleme Miktarı (F)	mm/dev.	0.12	0.175	0.25
Paso Miktarı (d)	mm	1	2	3

### 3 Bulgular ve tartışma

Tablo 4' te kesme parametrelerinin elektrik tüketimi ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri verilmektedir. Ayrıca Minitab 19 yazılımı kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ve elektrik tüketimi üzerine matematiksel modeller oluşturulmuş (Denklem (2) ve (3)), elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanarak Tablo 4' te sunulmuştur. Yüzey pürüzlülüğü ve elektrik tüketimine ait modeller sırasıyla Denklem (2) ve (3)' te verilmektedir. Görüldüğü

üzere yüksek R<sup>2</sup> değerleri yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketim değerleri için oluşturulan matematiksel modellerin deneysel veriler ile yakın sonuçlar çıkaracağını göstermektedir.

$$\text{Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)} = -0.933 + 14.540 * F + 0.0944 * d - 0.00156 * V_c \quad (2)$$

$$R^2 = \% 97.63$$

$$R^2 (\text{adj.}) = \% 97.32$$

$$\text{Güç Tüketimi (kW)} = -0.094 + 2.432 * F + 0.2244 * d + 0.008578 * V_c \quad (3)$$

$$R^2 = \% 90.89$$

$$R^2 (\text{adj.}) = \% 89.70$$

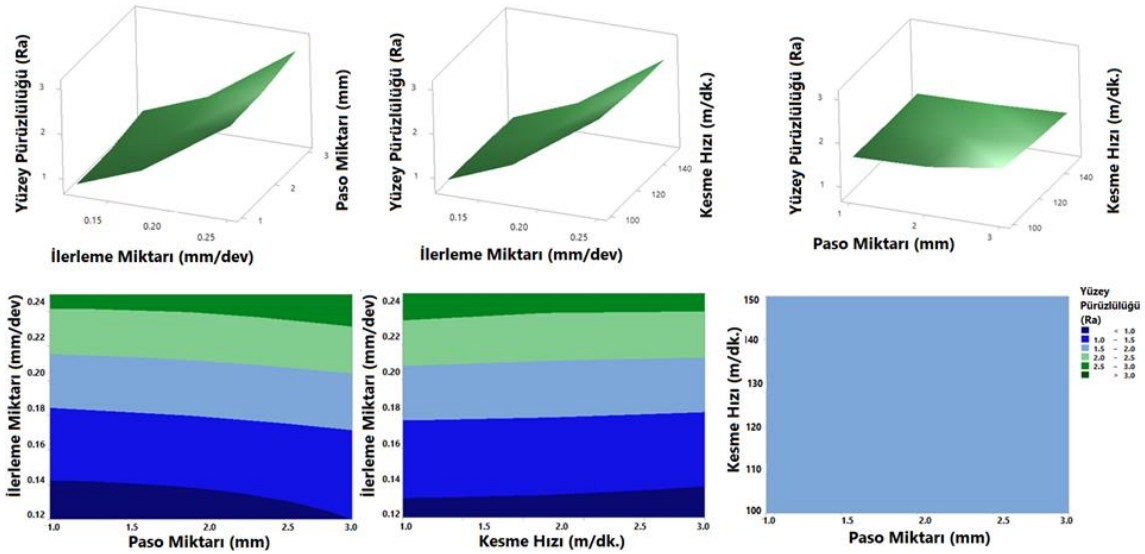
Tablo 4'te kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine deneysel sonuçlar incelendiğinde genel olarak sabit kesme hızı ve paso miktarında ilerleme miktarı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin de artış gösterdiği gözlenmektedir. Örneğin, 100 m / dk.'lık bir kesme hızı ve 1 mm'lik paso miktarı için, 0.12 mm / dev. olan ilerleme miktarı 0.25 mm /dev. değerine yükseldiğinde, 0.86 Ra yüzey pürüzlülük değeri, 2.69 Ra değerine kadar yükseldiği anlaşılmaktadır. Başka bir deyişle, kesme hızı ve paso miktarı sabit olmasına rağmen, ilerleme miktarının 0.12 mm / dev. 'den 0.25 mm / dev.' e yükselmesi, yüzey pürüzlülük değerlerinin yaklaşık %212 oranında artmasına neden olmuştur.

Tablo 4'teki sonuçları daha rahat okuyabilmek amacıyla 3 boyutlu yüzey ve kontur grafikleri (3D surface plots) oluşturulmuştur (Şekil 2). Şekil 2' teki grafiklere bakıldığında yüzey pürüzlülüğünün ilerleme miktarının artışıyla birlikte arttığı görülmektedir. Öte yandan sabit ilerleme miktarları için kesme hızı ve paso miktarının artışıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinin kayda değer bir şekilde değişmediğini kontur grafiklerden ve yapılan ANOVA analizlerinden anlaşılmaktadır. Kontur grafiklerinden ayrıca kesme hızının ve paso miktarının belirlenen seviyelerinde ortalama bir yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir (Şekil 2). Kaladhar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da, ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisine ilişkin benzer sonuçlar gözlenmiştir [4].

Yüzey pürüzlülüğü için geliştirilen matematiksel modelin deneysel çalışmalarla benzer sonuçlar verdiği Tablo 4' te görülmektedir. Bu modelin kullanımı sayesinde AISI 304 paslanmaz çeliğin tornalanması sırasında farklı parametre değerleri için yüzey pürüzlülük değerlerinin aynı koşullar altında tahmin edilmesi mümkün olacaktır. Modeller ile deneysel sonuçlar arasında ortalama olarak %7'lik bir fark olduğu görülmüştür. Deneysel verilerin desteklenmesi ve daha sağlıklı bir yorumlama yapabilmek amacıyla Minitab 19 yazılımı ile Varyans Analizi (ANOVA) yapılmıştır (Tablo 5 ve 6). Tablolardaki F, P ve DF değerleri sırasıyla varyans oranı, önem faktörü ve serbestlik derecesini göstermektedir. Analizler %95 güven düzeyinde ( $\alpha = 0.05$ ) gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 4.** Kesme parametre ve seviyelerinin yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimi üzerine etkileri

Paso (mm)	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/dev.)	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)- Deneysel	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)- Model	Fark (%)	Enerji Tüketimi (kW)-Deneysel	Enerji Tüketimi (kW)-Model	Fark (%)
1	100	0.12	0.86	0.75	12.8	1.27	1.28	0.79
2	100	0.12	0.84	0.84	0.5	1.53	1.50	1.67
3	100	0.12	1.06	0.94	11.4	1.49	1.73	16.03
1	100	0.175	1.36	1.55	14.0	1.52	1.41	6.99
2	100	0.175	1.46	1.64	12.6	1.71	1.64	4.20
3	100	0.175	1.63	1.74	6.7	1.85	1.86	0.68
1	100	0.25	2.69	2.64	1.8	1.56	1.60	2.32
2	100	0.25	2.73	2.73	0.2	1.78	1.82	2.28
3	100	0.25	3.08	2.83	8.1	2.11	2.05	3.08
1	125	0.12	0.8	0.71	11.1	1.63	1.49	8.31
2	125	0.12	0.85	0.81	5.2	1.79	1.72	3.97
3	125	0.12	1.05	0.90	14.3	1.86	1.94	4.48
1	125	0.175	1.39	1.51	8.7	1.66	1.63	1.91
2	125	0.175	1.46	1.61	10.0	1.91	1.85	3.00
3	125	0.175	1.53	1.70	11.1	2.1	2.08	1.09
1	125	0.25	2.67	2.60	2.6	1.81	1.81	0.04
2	125	0.25	2.7	2.70	0.2	2	2.04	1.75
3	125	0.25	2.81	2.79	0.7	2.2	2.26	2.70
1	150	0.12	0.84	0.67	20.0	1.72	1.71	0.64
2	150	0.12	0.85	0.77	9.8	1.94	1.93	0.34
3	150	0.12	0.9	0.86	4.3	2.14	2.16	0.83
1	150	0.175	1.36	1.47	8.2	1.73	1.84	6.51
2	150	0.175	1.4	1.57	11.9	2	2.07	3.36
3	150	0.175	1.49	1.66	11.5	2.36	2.29	2.90
1	150	0.25	2.67	2.56	4.0	1.86	2.03	8.88
2	150	0.25	2.71	2.66	2.0	2.24	2.25	0.42
3	150	0.25	2.79	2.75	1.4	2.69	2.47	8.03



**Şekil 2** Farklı tornalama parametreleri ve seviyelerine göre yüzey pürüzlülüğü için 3B yüzey ve kontur grafikleri

Dolayısıyla 0.05 değerinden daha küçük P değerlerine sahip parametrelerin etkili, 0.05 değerinden daha büyük P değerlere sahip parametrelerin ise etkisiz oldukları yorumlanabilir. İstatistiksel analiz sayesinde parametre ve seviyelerinin hem yüzey pürüzlülüğü hem de güç tüketimi üzerindeki katkı oranlarını (%) belirlenebilmektedir. Ayrıca, ideal parametre ve seviyelerini araştırmak için ana etki grafikleri (Main Effect Plot) oluşturulmuştur. X eksenini her parametrenin değerini üç seviyede gösterirken, y eksenini yanıt değerlerini (yüzey pürüzlülüğü veya güç tüketimi) gösterir.

Tablo 5'e göre ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin oldukça yüksek olduğu (%98.29),

ilerleme miktarını takiben paso miktarının az da olsa (%1.19) etkili olduğu görülebilmektedir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülük değerinin kesme hızının artışıyla birlikte azaldığı ana etki grafiklerinden anlaşılmaktadır (Şekil 3). Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin (%0.16) göz ardı edilebilir olduğu istatistiksel analiz ile göz ardı edilebilir olduğu anlaşılmaktadır. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi, benzer çalışmaların sonuçlarına paralellik göstermektedir [26,27]. ANOVA analizi sayesinde kesme parametrelerinin birbirleriyle etkileşimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin de oldukça sınırlı olduğu da anlaşılmıştır (Tablo 5).

**Tablo 5.** ANOVA analizi (Yüzey Pürüzlülüğü)

Parametre	DF	Seq. SS	%Katkı	Adj. SS	Adj. MS	F-Değeri	P-Değeri
F	2	2.36857	<b>98.29%</b>	2.36857	1.18429	3881.09	<b>0.000</b>
V <sub>c</sub>	2	0.00391	0.16%	0.00391	0.00196	6.41	0.022
d	2	0.02863	<b>1.19%</b>	0.02863	0.01431	46.91	<b>0.000</b>
F* V <sub>c</sub>	4	0.00051	0.02%	0.00051	0.00013	0.42	0.789
F*d	4	0.00127	0.05%	0.00127	0.00032	1.04	0.443
V <sub>c</sub> *d	4	0.00455	0.19%	0.00455	0.00114	3.73	0.053
Hata	8	0.00244	0.10%	0.00244	0.00031		
Toplam	26	2.40990	100.00%				

Şekil 3' teki, ana etki grafiklerine göre, tormalama işlemi sırasında en iyi yüzey kalitesi (en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri ) için ideal parametreler aşağıdaki gibi olmalıdır;

İlerleme miktarı: 0.120 mm/dev.

Kesme hızı: 150 m/dk.

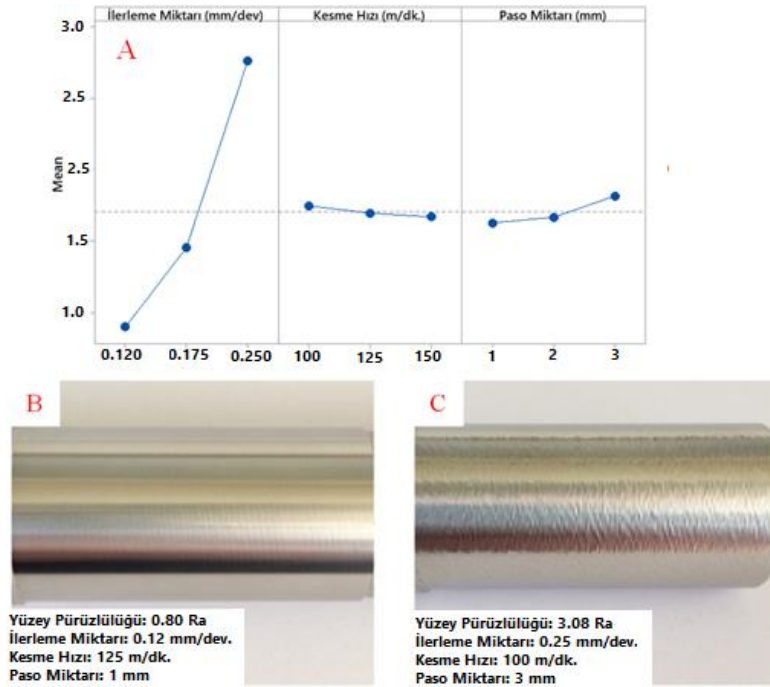
Paso miktarı: 1 mm

Bu değerler kullanılarak gerçekleştirilen tormalama işlemi neticesinde oluşan pürüzsüz yüzey görüntüsü (0.80 Ra) Şekil 3b'de verilmektedir.

Kesme parametrelerinin ve seviyelerinin enerji tüketimi üzerine sonuçları incelediğimizde yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinden daha farklı olduğu gözlenmiştir (Tablo 4). Diğer bir deyişle, yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme miktarının etkisinin oldukça baskın olduğu (%98), kesme hızı ve paso miktarı gibi diğer parametrelerin ise işleme sırasında güç tüketimini etkilediği görülebilmektedir. Örneğin 0.25 mm/dev ilerleme miktarı ve 100 m/dk. kesme hızı için paso miktarı 1 mm'den 3 mm'ye yükseltirse güç tüketiminin 1.56 kW'dan 2.11 kW'a çıktığı görülmüştür. Böylelikle güç tüketiminin %35 oranında arttığı tespit edilmiştir (Tablo 4). Dolayısıyla sabit kesme hızı ve ilerleme

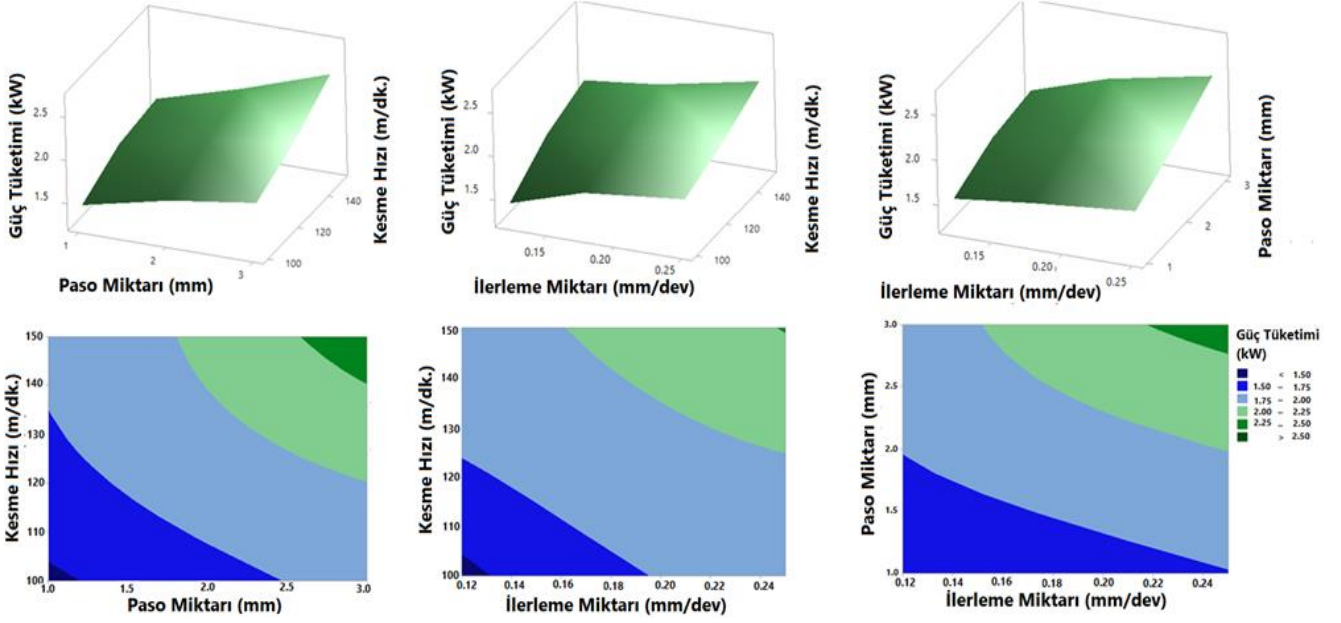
miktarlarında enerji tüketimi paso miktarı ile doğru orantılı olarak değişmiştir. Öte yandan örneğin 3 mm paso miktarı ve 100 m / dk. kesme hızı için, ilerleme miktarında 0.12 mm / dev. değerinden 0.25 mm / dev. miktarına geçiş, güç tüketiminin 1.49 kW'dan 2.11 kW'a çıkmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü sonuçlarında olduğu gibi, enerji tüketimi üzerinde sadece tek bir parametrenin baskın bir etkiye sahip olduğu sonucuna varılamaz. Genel olarak, Tablo 4'te sunulan sonuçlar bize, en yüksek güç tüketiminin 0.25 mm / dev ilerleme miktarı, 150 m / dk. kesme hızı ve 3 mm paso miktarı için 2.69 kW olarak bulunduğunu göstermektedir. En düşük güç tüketimi ise 0.12 mm/dev ilerleme miktarı, 100 m/dk. kesme hızı ve 1 mm paso miktarında 1.27 kW olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4'te ise farklı tormalama parametre ve seviyeleri dikkate alınarak güç tüketimi değişimleri 3B yüzey ve kontur grafikleri ile gösterilmiştir. Verilen grafiklere dikkatlice bakıldığında her üç kesme parametresinin artmasıyla birlikte güç tüketim değerlerinin de artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Buna göre düşük güç tüketimi için düşük ilerleme miktarı, paso miktarı ve kesme hızlarında çalışılması gerekmektedir.



Şekil 3 Yüzey pürüzlülük değerlerine ait (a) ana etki grafikleri (b) en iyi yüzey kalitesi (c) en kötü yüzey kalitesi

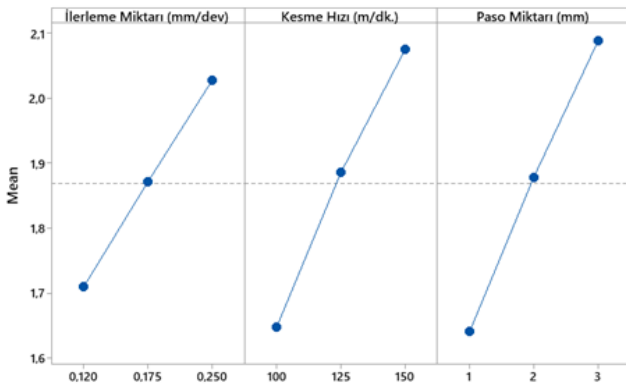




Şekil 4 Farklı tornalama parametreleri ve seviyelerine göre güç tüketimi için 3B yüzey ve kontur grafikleri

Güç tüketimi açısından ideal parametre ve seviyelerini belirleyebilmek adına ana etki grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Ana etki grafiklerine göre en düşük güç tüketimi için 0.12 mm/dev. ilerleme miktarı, 100 m/dk. kesme hızı ve 1 mm paso miktarı ile tornalama işleminin yapılması gereklidir. Diğer yandan 0,25 mm/dev. ilerleme miktarı, 150 m/dk. kesme hızı ve 3 mm paso miktarı ile tornalamada en yüksek güç tüketimi olacaktır.

Güç tüketimi açısından ideal parametre ve seviyelerini belirleyebilmek adına ana etki grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Ana etki grafiklerine göre en düşük güç tüketimi için 0.12 mm/dev. ilerleme miktarı, 100 m/dk. kesme hızı ve 1 mm paso miktarı ile tornalama işleminin yapılması gereklidir. Diğer yandan 0.25 mm/dev. ilerleme miktarı, 150 m/dk. kesme hızı ve 3 mm paso miktarı ile tornalamada en yüksek güç tüketimi olacaktır.



Şekil 5. Güç tüketim değerlerine ait ana etki grafikleri




Tablo 6'da, üç parametre ve farklı seviyelerinin güç tüketimi üzerine etki miktarlarını gösteren ANOVA analizi verilmektedir. Bu tablodan her üç parametrenin de güç tüketimi üzerine etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Katkıların sayısal değerlerini bulmak için ANOVA sonuçlarına

bakıldığında, güç tüketimi üzerinde en etkili parametrenin %37.63 katkı oranı ile paso miktarı olduğu, bunu sırasıyla %35.46 ve %19.27 katkı oranı ile kesme hızı ve ilerleme miktarının izlediği görülebilmektedir (Tablo 6). Mahdevinejad ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmaya göre güç tüketim değerinin paso miktarı ile doğrudan artması, kesme düzlem açısının paso miktarına paralel bir şekilde artması ve dolayısıyla malzemede plastik deformasyon için daha fazla güç tüketimine ihtiyaç duyulması ile açıklanabilmektedir [28]. Diğer yandan parametrelerinin ikili etkileşimlerinin %2 civarı etkisinin olduğu ve P değerlerine bakıldığında 0.05 değerlerinden büyük P değerlerine sahip oldukları için ikili etkileşimlerinin güç tüketimi üzerine anlamlı bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Tablo 7'de, AISI 304 paslanmaz çeliği çubukların tornalanması esnasında farklı parametre değerlerinin oluşan talaş tiplerine etkisi gösterilmektedir. Genel olarak, ilerleme miktarı arttıkça talaşların plastik deformasyon davranışı gösterdiği ve buna bağlı olarak süreksiz talaşların oluştuğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular farklı çalışmalardan elde edilen sonuçlarla tutarlılık göstermektedir [3]. Buna göre sabit paso miktarı ve kesme hızları için düşük ilerleme miktarlarında sürekli talaş tipi oluşumu gözlenirken yüksek ilerleme miktarlarına çıkıldıkça süreksiz talaş tipinin oluştuğu anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmalarımız neticesinde her ne kadar düşük ilerleme miktarlarında düşük yüzey pürüzlülük değerleri yakalansa da oluşan sürekli talaş tipine karşı talaşlı işleme esnasında önlemlerin (kesme sıvısı kullanımı, talaş kırıcı takım tasarımı, basınçlı hava gibi) alınması da gerekmektedir. Aksi takdirde oluşan sürekli talaşlar iş parçasına dolanıp yüzey pürüzlülüğünü arttırabileceği gibi takım aşınmasına da neden olabilmektedir. AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimi üzerine elde ettiğimiz sonuçların yanı sıra oluşan talaş tiplerini de dikkate alarak parametre değerlerinin seçimi gerçekleştirilmelidir.

**Tablo 6.** ANOVA analizi (Güç Tüketimi)

Parametre	DF	Seq. SS	%Katkı	Adj. SS	Adj. MS	F-Değeri	P- Değeri
F	2	0.060807	<b>19.27</b>	0.060807	0.030404	94.69	<b>0.000</b>
V <sub>c</sub>	2	0.111864	<b>35.46</b>	0.111864	0.055932	174.20	<b>0.000</b>
d	2	0.118725	<b>37.63</b>	0.118725	0.059362	184.89	<b>0.000</b>
F* V <sub>c</sub>	4	0.005874	1.86	0.005874	0.001468	4.57	0.032
F*d	4	0.008378	2.66	0.008378	0.002095	6.52	0.012
V <sub>c</sub> *d	4	0.007258	2.30	0.007258	0.001814	5.65	0.018
Hata	8	0.002569	0.81	0.002569	0.000321		
Toplam	26	0.315475	100.00				

**Tablo 7.** Farklı kesme parametrelerine göre oluşan talaş tipleri

İlerleme Miktarı [mm/dev.]	Kesme Hızı [m/dk.]	Paso Miktarı [mm]	Talaş Tipi
0.12	125	1	
0.175	125	1	
0.25	125	1	

#### 4 Sonuçlar

Çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliğinin tornalama işlemi sırasında farklı parametre ve seviyelerin yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimi üzerindeki etkileri istatistiksel analizlerle analiz edilmiştir. İstatistiksel analiz çalışmaları ile toplam 27 farklı yüzeyin işlenmesiyle elde edilen veriler kolaylıkla değerlendirilebildiği anlaşılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve ANOVA analizleri sayesinde parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimi üzerinde farklı etkileri olduğunu anlamayı mümkün kılmıştır. Paso miktarı ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı ve ilerleme miktarının %98'lik baskın bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşılık, her üç parametrenin de enerji tüketimi için etkili olduğu çalışma neticesinde anlaşılmıştır. Bu anlamda sırasıyla paso miktarının %44, kesme hızının %24 ve ilerleme miktarının %19 katkı oranlarında güç tüketimi üzerinde etkileri olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü açısından ideal parametre değerleri 0.12 mm/dev. ilerleme miktarı, 125 m/dk. kesme hızı ve 1 mm paso miktarı olarak bulunmuştur. Güç tüketimi açısından ise 0.12 mm/dev ilerleme miktarı, 100 m/dk. kesme hızı ve 1 mm paso miktarının ideal parametre değerleri olduğu anlaşılmıştır. Sonuç olarak AISI 304 paslanmaz çeliklerin tornalanmasında düşük güç tüketimi ile iyi bir yüzey kalitesi elde etmek amacıyla küçük ilerleme miktarı, düşük kesme hızı ve paso miktarlarında çalışılması gerektiği çalışma sonunda tavsiye edilmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

#### Kaynaklar

- [1] B.L. Juneja, G.S. Sekhon and S. Nitini, Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools 2nd ed. New Age International Ltd. Publishers, New Delhi, 2003.
- [2] C.S. Milton, Metal Cutting Principles 2nd ed. Oxford University Press, United Kingdom, 2004.
- [3] K. Yunus and A. Ahmet, Investigation of machinability characteristics of AISI 316Ti stainless steel. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(1), 61-71, 2012. <https://doi.org/10.5505/pajes.2012.58076>
- [4] M. Kaladhar, K.S. Venkata and C.S. Rao, Determination of optimum process parameters during turning of AISI 304 Austenitic stainless steel using Taguchi method and ANOVA. International Journal of Lean Thinking, 3(1),1-22, 2012.
- [5] X. Anthony and M. Adithan, Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. Journal of Material Processing Technology, 209, 900-909,2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.068>.
- [6] H. Aouici, M.A. Yaltese, B. Fnides, K. Chaoui and T. Mabrouki, Modelling and optimization of hard turning of x38crmov5-1 steel with cbn tool machining

- parameters effects on flank wear and surface roughness. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25, 2843-51, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12206-011-0807-z>
- [7] Y. Sahin and A.R. Motorcu, Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 26, 84-90, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2007.02.005>
- [8] J.P. Davim, A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 116, 305-308, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01063-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01063-9)
- [9] Ç. Selim and D. Suat, AISI 4140 çeliğinin işlenmesinde kesici uç geometrisinin talaş kırma ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi. *Düzcce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, 765-771, 2016.
- [10] M. Aruna and V. Dhanalakshmi, Optimization of turning parameters of inconel 718 alloy using RSM. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 25, 113-134, 2012. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2012.047722>
- [11] R.P. Pragadesh and V.A. Patel, Effect of machining parameters on surface roughness and power consumption for 6063 Al alloy TiC composites (MMCs). *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(4), 295-300, 2012.
- [12] P. Sahoo, Optimization of turning parameters for surface roughness using RSM and GA. *Advances in Production Engineering and Management*, 6(3), 197-208, 2011.
- [13] İ. Korkut, M.A. Donertas and U. Seker, Three-Dimensional dynamometer design and production. *Karabuk Technical Education Faculty Journal Technology*, 2, (1-2), 115-129, 1999.
- [14] U.S. Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2019*, Washington, 2019.
- [15] R. Fernando, J. Gamage and H. Karunathilake, Sustainable machining: environmental performance analysis of turning. *International Journal of Sustainable Engineering*, yayın aşamasında (ahead of print), 1-20, 2021. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1995524>.
- [16] S. Emin, K. Mustafa, A. Abdullah and Y.P. Danil, The effects of mql and dry environments on tool wear, cutting temperature, and power consumption during end milling of aisi 1040 steel. *Metals*, 11, 1674, 2021. <https://doi.org/10.3390/met11111674>.
- [17] K.R. Roopa, M. Vinay, A.S. Deshpande and K.K. Jadhav, Analysis of effect of cutting parameters on responses surface roughness and material removal rate for En 19 work-pieces material with and without Heat Treatment. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 6(1), 69-77, 2015.
- [18] K.S. Ajit, B. Abhijit, S. Avinash, M. Omkarnath and M. Satyajeet, Effect of machining parameters on cutting forces during turning of mild steel on high speed lathe by using Taguchi orthogonal Array. *Global Journal of Advanced Research*, 1(1), 28-35, 2014.
- [19] H.K. Vijaykumar, S. Aboobaker and S. Muhammed, Optimization of turning parameters using Taguchi technique for MRR and surface roughness of hardened AISI 52100 steel. *Journal of Engineering Research and Applications*, ISSN:2248-9620, 4 (5), 39-44, 2014.
- [20] S.D. Philip and P. Chandramohan, Optimization of surface roughness of AISI 304 austenitic stainless steel in dry turning operation using Taguchi design method. *Journal of Engineering Science and Technology*, 5(3), 293-301, 2010.
- [21] R.M. Venkata, K. Srinivasulu and M.R.G. Krishna, Performance evaluation and selection of optimal parameters in turning of Ti-6Al4V alloy under different cooling conditions. *International Journal of Innovative Technology and Creative Engineering*, 1(5), 134-41, 2011. <https://doi.org/10.18178/IJMMM>
- [22] V. Marinkovic and M. Madic, Optimization of surface roughness in turning alloy steel by using Taguchi method. *Scientific Research and Essays*, 6(16), 3474-3484, 2011. <https://doi.org/10.5897/SRE11.704>
- [23] K.K. Adarsh, C. Ratnam, B.S.N. Murthy and B.B. Satish, Optimization of surface roughness in face turning operation in machining of EN-8. *International Journal of Engineering Science and Advanced Technology*, 2(4), 807-812, 2012.
- [24] M.T. Sreenivasa, R.K. Suresh, G. Krishnaiah and R.V. Diwakar, Optimization of process parameters in dry turning operation of EN 41B alloy steels with cermet tool based on the Taguchi method. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 3, 1144-1148, 2013.
- [25] H.M. Somashekara and S.N. Lakshmana, Optimizing surface roughness in turning operation using Taguchi technique and ANOVA. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(5), 1965-73, 2012.
- [26] M.A. Khan, J.K. Kittur and D.K. Vishal, Study and analysis of effect of cutting parameters on cutting forces and surface roughness. *Advanced Engineering and Applied Sciences: An International Journal*, 5(3), 63-73, 2015.
- [27] C. Özek and V. Taşdemir, Modelling of surface roughness with variance analysis in turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *e-Journal of New World Science Academy*, 4(3), 305-314, 2009.
- [28] R.A. Mahdavinjad and S. Saeedy, Investigation of the influential parameters of machining of AISI 304 stainless steel. *36(6)*, 963-70, 2011. <https://doi.org/10.1007/S12046-011-0055-Z>





## Investigation of material models on deep drawing and ironing processes

### Derin çekme ve ütüleme proseslerinde malzeme modellerinin incelenmesi

Cihangir Kaplan<sup>1,\*</sup>, Cem Güleç<sup>2</sup>, Mesut Arıkoğlu<sup>3</sup>, Serkan Toros<sup>4</sup>,  
Habip Gökay Korkmaz<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> Kentpar Automotive, Research and Development Center, 42100, Konya, Turkey

<sup>4,5</sup> Niğde Ömer Halisdemir University, Mechanical Engineering Department, 51240, Niğde, Turkey

#### Abstract

Within the scope of this study, the effects of yield and hardening criteria used in forming simulations on part geometric dimensions were investigated. As material 0.8 mm thick DC04 material is used. In the study, the results were compared using the Hill-48 and Barlat-91 yield criteria and experimental flow curve, Hockett-Sherby, Ludwig and Hollomon flow curve models. The studies were carried out in Simufact Sheet Metal Form software. Although all the models studied because of dimensional evaluations estimated within tolerance values, the model in which the experimental data were used with Hill-48 gave the closest results to the nominal dimensions.

**Keywords:** Sheet metal forming, Yield criteria, Deep drawing, Ironing

#### 1 Introduction

In sheet metal forming processes, deep drawing, blanking and ironing are the most commonly used production technologies for mass production [1, 2]. Due to its short lead time and optimum cost efficiency, it is one of the first technologies that is the reference of mass production markets in the white goods and automotive industries [3].

The concept of material formability is important when talking about sheet metal forming, as it limits how deformable the material can be. Formability is defined as the ability of sheet metal to deform into a desired form without local necking or fracture. Formability depends on several factors such as material properties or process parameters strain paths, strain rate, temperature, etc.

By using various processes such as punching-blanking, bending, deep drawing and other methods with sheet metal die, it is possible to obtain aesthetic parts with both mechanical properties and visuals requested by the customer, within the tolerances specified in the technical drawing, even in the one millionth printing. Each process has some parameters that define the quality of the work obtained [4, 5].

The ability of a sheet metal to be forming without the mentioned defects is called formability. The forming surfaces of the die tools should be developed in such a way that they can make the product form error-free. In this context, the formability of the material should be analyzed in

#### Öz

Bu çalışma kapsamında, şekillendirme simülasyonlarında kullanılan akma ve pekleşme kriterlerinin parça geometrik boyutlarına etkisi incelenmiştir. Malzeme olarak 0.8 mm kalınlığındaki DC04 malzemesi kullanılmıştır. Çalışmada Hill-48 ve Barlat-91 akma kriterleri ile deneysel akma eğrisi, Hockett-Sherby, Ludwig ve Hollomon akma eğrisi modelleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmalar Simufact Sheet Metal Form yazılımında gerçekleştirilmiştir. Boyutsal değerlendirmeler neticesinde çalışılan bütün modeller her ne kadar tolerans değerleri içerisinde tahmin etmiş olsa da deneysel verilerinin Hill-48 ile kullanıldığı model nominal boyutlara en yakın sonuçları vermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sac metal şekillendirme, Akma kriterleri, Derin çekme, Ütüleme

terms of process parameters. The first die surfaces developed in the CAD environment are updated as a result of examining the ability of materials to take form and the effect of process parameters on this form by using finite element analysis, and this process is provided iteratively. Each iteration step represents a finite element analysis or optimization step [6, 7]. Sheet metal forming simulations have high non-linearity due to large deformations and the presence of contact faces.

Finite element analysis is used for formability while developing components to be produced by sheet metal forming [8]. The use of numerical simulation has become critical in recent years as a way to optimize tool forming by predicting the outcome of the forming process. This provides significant reductions in trial time and effort [9].

The plastic forming method aims to obtain a permanent form by forcing a material to deform with a load above its yield stress. Sheet metal forming needs two equipments, press and die, for deep drawing, blanking and spinning processes [10]. With the application of pressure on the male (punch) and female tool bodies (dies), material flows die cavity and this forming step is called sheet metal forming [11]. A schematic outline of the sheet metal forming die system is shown in Figure 1.

Blanking is the separation process of the raw material in accordance with the desired size and geometry. The blanking

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kaplancihangir@gmail.com (C. Kaplan)

Geliş / Received: 14.12.2021 Kabul / Accepted: 07.03.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1034351



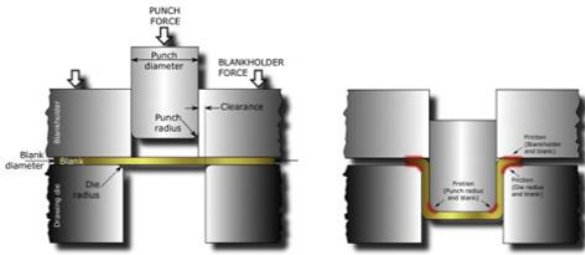


Figure 1. Schematic sheet metal forming setup [12]

process starts with the contact of the punch with the material. At first, fractures occur at both the upper and lower points. With further advancement of the punch, the elastic limit of the material is exceeded, and the material undergoes plastic deformation. These events occur in the first phase of blanking process. A force or predetermined motion is applied to the punch that causes it to move downward. In some press setups, the punch is fixed and the cavity of the dies is moved towards the punch. The blank contacts the punch and deformation of the blank is initiated. For this to happen, the sample must be restricted from moving in the same direction as the punch obtained by the spacer.

In this study, the deep drawing and ironing processes of DC04 EN 10130 sheet material, which is widely used in the manufacturing industry, were examined according to different the yield and hardening criteria. In the analysis studies, the dimensional geometric dimensions of the determined model and sheet metal sample were examined.

## 2 Material and method

DC04 EN10130 sheet material, which is in high demand in the manufacturing industry, is a cold rolling product and is frequently used in the automotive industry and in the white goods industry. The chemical components of DC04 EN10130 material forming in die designed for the scope of the study are given in Table 1. It has significant advantages in the forming ability of the material, the main alloying element of which is C.

Table 1. Chemical composition of DC04 EN10130 cold rolled steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.007	0.006	0.138	0.003	0.009	0.037	0.03	0.073

The stress strain curve is one of the important data used to investigate the mechanical properties of a material. Finite element analyzes play an important role in sheet metal forming processes and in the evaluation of results. In finite element analysis, the true stress-strain curve of the sheet material is generally preferred as the input parameter. It is necessary to obtain the yield curve of the material, especially in forming processes where the sheet is exposed to large deformations. The stress-strain curve of a sheet is usually obtained from the tensile test. It is not easy to obtain the curve for large strains after tensile strength. Even the strain corresponding to the tensile strength has lost its ability to describe the material property [5].

One of the main factors affecting the geometric tolerances of the product is the material properties. Therefore, it is necessary to determine the mechanical properties of the material. Tensile tests are performed for the mechanical properties of the material such as yield stress, tensile stress, elastic modulus, poisson's ratio. Samples were prepared from DC04 EN 10130 cold rolled material, which will be used in the process, by determining the dimensions in accordance with ASTM E8 standard. Sample dimensions of the ASTM E8 standard are shown in Figure 2.

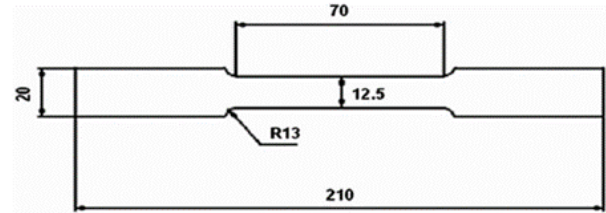


Figure 2. Sample sizes in accordance with ASTM E8 standard [13]

To determine the yield, tensile and fracture stresses of the material with tensile tests, the stress-strain curve must be plotted. In Figure 3, the flow curve of 0.8 mm thick DC04 EN 10130 sheet material obtained at a strain rate of  $0.00833s^{-1}$  (25 mm/min) is shown. One of the essential material properties in the sheet forming is the Lankford parameters which are required to calculate the coefficients of the anisotropic yield criteria.

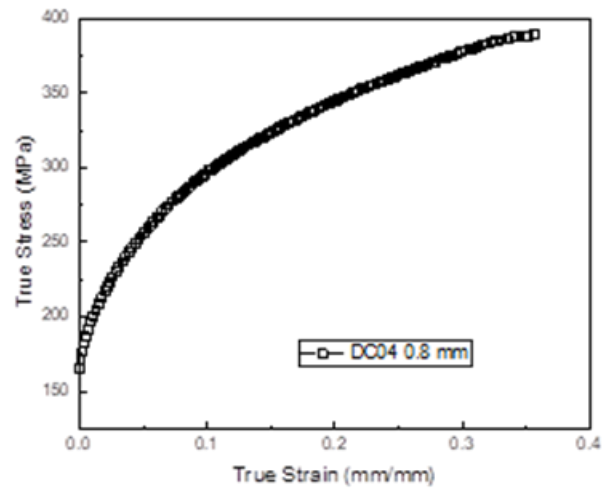


Figure 3. Flow curve of 0.8 mm DC04 EN10130

Table 2. Mechanical properties of DC04 EN10130 cold rolled steel

Mechanical Property	Value
Young' modulus (MPa)	180000
Poisson' ratio	0.283
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7851
Tensile strenght (MPa)	388
R <sub>0</sub> /σ <sub>0</sub>	1.85/166
R <sub>45</sub> /σ <sub>45</sub>	1.25/175
R <sub>90</sub> /σ <sub>90</sub>	2.25/170

Mechanical properties of DC04 EN 10130 sheet material are given in Table 2 to create a model for Simufact Sheet Metal Forming analysis. In the related model, yield strengths of the material in three different directions (0,45,90) and Lankford parameters are defined.

### 2.1 Material models

Within the scope of the study, some of the flow curve models in the material property section of the Simufact Sheet Metal Forming software were used and their performances in the forming simulations were compared. First, flow curve modeling of DC04 material was performed and experimental flow curve, Hockett-Sherby, Ludwig and Hollomon equations were used.

The equation of the Hockett-Sherby model is expressed as follows.

$$\sigma_F = b - (b - a) \cdot e^{-m \cdot \varphi^n} \quad (1)$$

Here,  $\sigma_F$  is the stress, a yield stress, n is the material parameter, m is the material, and  $\varphi$  is the strain.

The equation of the Ludwig model is expressed as follows.

$$\sigma_F = A + C \cdot \varphi^N \quad (2)$$

Here,  $\sigma_F$  stress, A yield stress, C strength efficient, N hardening exp.,  $\varphi$  strain values.

The equation of the Cold Forging Metal Form-2 (Hollomon Eq.) model was used. The equation is given below.

$$\sigma_F = C \cdot \varphi^N \quad (3)$$

Here,  $\sigma_F$  is stress, C is strength efficient, N is hardening exp.,  $\varphi$  is strain.

Another important model used in the simulations of sheet metal forming processes is yield surface models. The yield surface models are the models that determine the plastic deformation of the material under multiaxial stresses that occur in multiaxial forming conditions. Although there are many studies in this field in the simulations, analyzes were carried out with reference to two anisotropic yield criteria in Simufact Software within the scope of this study. These anisotropic yield surfaces are Hill-48 and Barlat-91, respectively. The equations of the relevant models are given below. Another important model used in the simulations of sheet metal forming processes is yield surface models. The yield surface models are the models that determine the plastic deformation of the material under multiaxial stresses that occur in multiaxial forming conditions. Although there are many studies in this field in the simulations, analyzes were carried out with reference to two anisotropic yield criteria in Simufact software within the scope of this study. These anisotropic yield surfaces are Hill-48 and Barlat-91, respectively. The equations of the relevant models are given below.

In the simulations, Hill-48 anisotropic yield criterion is used forming processes, and the criterion is given in Equation 4 as a quadratic function [14]

$$2f(\sigma_{ij}) \equiv F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (4)$$

Here, f is the yield function, F, G, H, L, M, N are the anisotropic parameters of the material and x, y, z are the principal anisotropic axes. In the case where the principal axes of the stress tensor coincide with the anisotropic axes ( $\sigma_x = \sigma_1, \sigma_y = \sigma_2, \tau_{xy} = 0$ ), the Hill-48 yield criterion is given in Equation 5 depending on the principal stresses and Lankford coefficients [15].

$$\begin{aligned} (\sigma_1^2) - \frac{2r_0}{1+r_0} \sigma_1 \sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_2^2 \\ = \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} r_{90}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

In order to establish the plasticity model, the yield criterion, flow rule and hardening rule must be defined. The yield criterion defines the elastic limit in the stress space, the flow rule determines the direction of the plastic strain increment, and the hardening rule defines the evolution of the yield surface. In this study, the yield criterion Yld91 was used for the definition of the initial anisotropy of the material and Yld91 is a six-component yield criterion. It was developed by Barlat [16]. This criterion is based on the linear transformation approach and is expressed as follows:

$$|S_1 - S_2|^m + |S_2 - S_3|^m + |S_3 - S_1|^m = 2\bar{\sigma}^m \quad (6)$$

$$s = \begin{bmatrix} \frac{C_5(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) - C_2(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})}{3} & C_6\sigma_{xy} & C_5\sigma_{zx} \\ C_6\sigma_{xy} & \frac{C_1(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}) - C_3(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}{3} & C_4\sigma_{zy} \\ C_5\sigma_{zx} & C_4\sigma_{zy} & \frac{C_2(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) - C_3(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})}{3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Where  $\sigma$  is the effective stress,  $S_1, S_2$  and  $S_3$  are the principal values of deviatoric stress tensor.

### 3 Process simulations

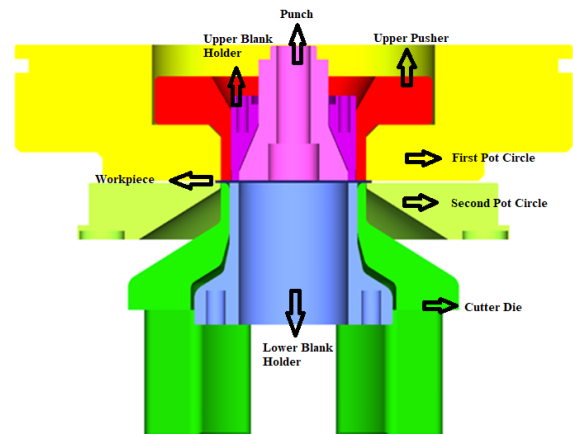


Figure 4. Forming die system view

The simulations of the blanking and spinning operations were carried out using the Sheet Metal Forming Module of the Simufact software. The tools in the system are assumed to be rigid. The surface interactions of the die elements and the sheet material are modeled according to Coulomb's Law. According to this law, the friction coefficient value of 0.08 was used in the analysis. In the finite element analysis model, the temperatures of the sheet/workpiece and die parts were taken as 20 °C. Adiabatic heating due to plastic deformation and temperature increases due to friction and their effects on the mechanical behavior of the sheet material are ignored. The tear control of sheet material in blanking and spinning operations was carried out using the normalized Cockroft Latham ductile material ductile fracture model, and the relevant model is given in Equation 8. In the equation,  $\sigma_{max}$  is the calculated maximum stress on the sheets and the  $\sigma_{eff}$  is the equivalent stress. In addition,  $\epsilon_{eff}^{pl}$  effective plastic strain and C is the critical damage factor which can be calibrated according to the failure strain of the materials during the given deformations.

$$\int_0^{\epsilon_f} \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{eff}} \cdot \epsilon_{eff}^{pl} dt \geq C \quad (8)$$

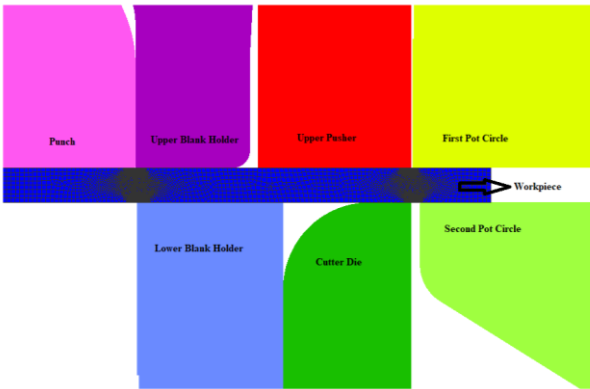


Figure 5. Workpiece mesh structure view

In Figure 5, the mesh structure of the workpiece, which was analyzed in the blanking and ironing die system, is shown. The mesh type of the workpiece was determined as Advancing Front Quad, and the element type was quadratic shell element. In this way, the workpiece has the number of elements 13488. Adaptive mesh has been added to the surfaces where blanking will be made. Thus, a denser mesh structure was provided in that region. It is aimed that the data to be obtained at the time of blanking and ironing is correct.

#### 4 Results and discussion

In this study, numerical analyses were performed using Simufact Sheet Metal Forming finite element software for the blanking, drawing and ironing operations. The automotive sheet metal spare part to be produced is shown in Figure 6. The appropriate yield and flow curve models were determined according to the prediction performance of geometrical dimensions with their tolerances for the specific regions of the formed part. In addition to forming operations,

the springback evaluation was also carried out for the selected part. As can be seen from Figure 6(b) the burr formation was also visualized and the dimensions were measured from the peak edge of the bottom and the flat side of the top of the formed part.

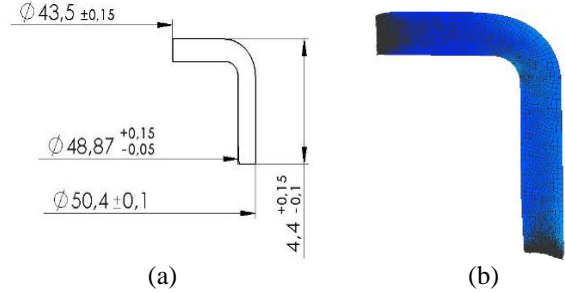


Figure 6. Technical drawing and analysis results

Experimental Flow Curve Table, Hockett-Sherby, Ludwig and Hollomon models can be found in Simufact Sheet Metal Forming Software to define the stress strain relation of the materials. Analyses were carried out according to these models. The models' fitting performances were illustrated in Figure 8. As can be seen from the figure, although the fitting performance shows good agreement with the experimental curve, extrapolated data of the model shows difference with the experimental data. These values are very important in the view of the calculation of the stresses for the propagate strain levels. Therefore, these differences affect the results of simulations particularly springback and failure predictions.

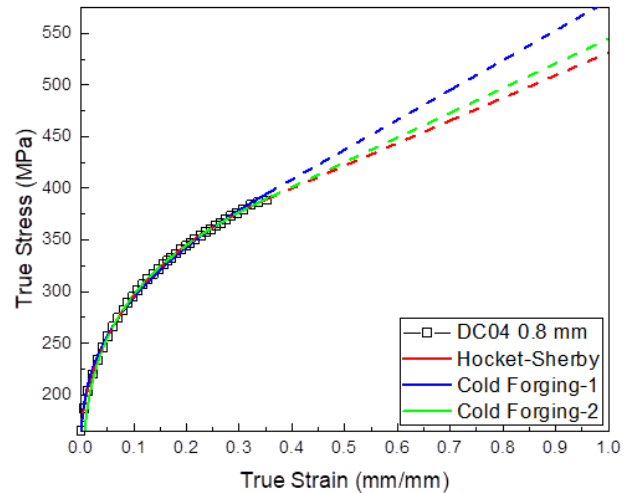


Figure 7. Tables flow curve model

After the graphics which is determined by regression model, (Figure 7) were created the model parameters of the equations of Hockett-Sherby, Ludwig and Hollomon models are given in the Table 3-4, respectively.

Eight analyzes were carried out by establishing models according to the yield and hardening criteria using the finite element software. The comparison of the sheet metal part to be produced according to the analysis results to the technical

**Table 3.** Hockett-Sherby equation value

Equation	Value
b	162.61
a	497.75
m	2.19
n	0.63
r-square	0.999

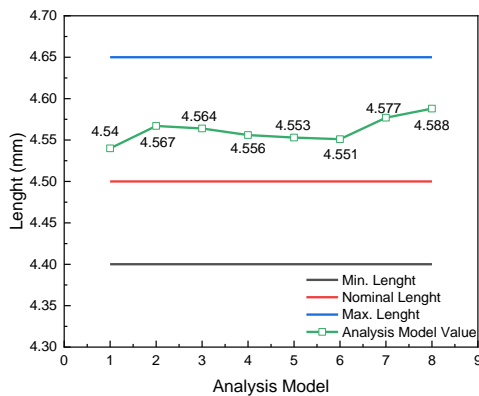
**Table 4.** Ludwig equation value

Equation	Value
A	162.61
C	497.75
N	2.19
r-square	0.997

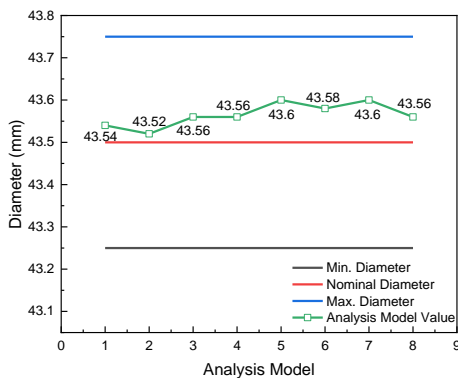
**Table 5.** Hollomon equation value

Equation	Value
A	489.27
N	0.21
r-square	0.975

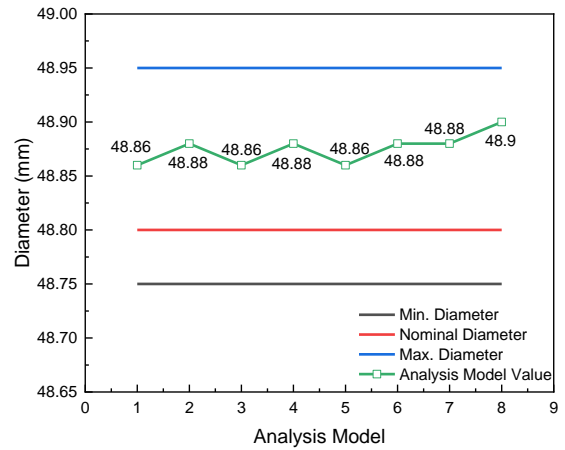
drawing dimensions is shown in Figures 9, 10, 11 and 12. As shown in the graphics, the Hill-48 model, which was prepared according to the experimental data, estimated 98.9% on average in the part length, hole diameter, inner and outer diameters. It is at a satisfactory level for the cases examined.



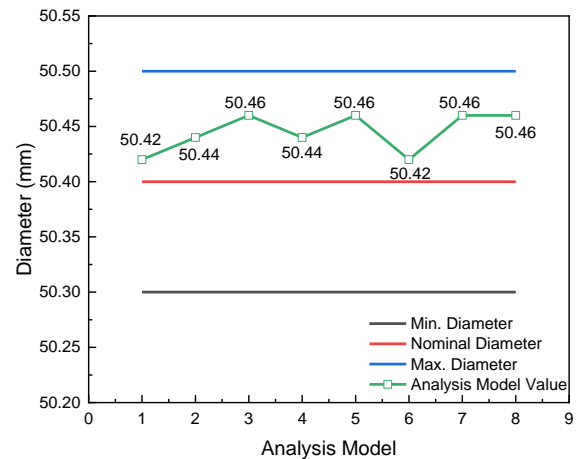
**Figure 8.** Part length results according to analysis models



**Figure 9.** Hole diameter results according to analysis models



**Figure 10.** Inner diameter results according to analysis models



**Figure 11.** Outer diameter results according to analysis models

## 5 Conclusion

In this study, the material model performances that are used in the such a complex forming simulations are evaluated. As a flow curve model Table of Experimental Data, Hockett-Sherby, Ludwig and Hollomon model were used. Besides that, Hill-48 and Barlat 91 yield criteria were used, and the results were compared. According to simulation results of the processes Hill-48 anisotropic yield criteria with the experimental flow curve has the best predictions in the view of the dimensional tolerances. As shown in the graphs, it was estimated at 99.11% in part length, 99.11% in hole diameter, 98.75% in inner diameter and 99.96% in outer diameter. It is at a satisfactory level for the cases examined.

## Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

**Similarity rate (iThenticate):** 9%

## References

- [1] V. L. Hattalli and S. R. Srivatsa, Sheet metal forming processes—recent technological advances, Materials



- Today: Proceedings, 5, 2564-2574, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.040>
- [2] Y. Jia, Y. Qiao, H. Pan, E. Chu, and Y. Bai, A Comprehensive plasticity and fracture model for metal sheets under multi-axial stress and non-linear strain path, SAE International Journal of Engines, 10, 266-273, 2017. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0315>
- [3] H. Zeng, Z. Huang, T. Wang, H. Sun, and L. Wang, Optimal design and forming analysis of the stamping process for front wall of automobile considering springback compensation technology, SAE Technical Paper, 0148-7191, 2021. <https://doi.org/10.4271/2021-01-0269>
- [4] Z. Wang, T. Hakoyama, Y. Endo, and K. Osakada, Application of flow model in metal cutting to cold forging of tubular products, CIRP Annals, 68, 273-276, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.033>
- [5] K. Zhao, L. Wang, Y. Chang, and J. Yan, Identification of post-necking stress-strain curve for sheet metals by inverse method, Mechanics of Materials, 92, 107-118, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.09.004>
- [6] I. Mirandola, G. A. Berti, R. Caracciolo, S. Lee, N. Kim, and L. Quagliato, Machine learning-based models for the estimation of the energy consumption in metal forming processes, Metals, 11, 833, 2021. <https://doi.org/10.3390/met11050833>
- [7] Q.-F. Zhang, Z.-Y. Cai, Y. Zhang, and M.-Z. Li, Springback compensation method for doubly curved plate in multi-point forming, Materials & Design, 47, 377-385, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.005>
- [8] J. Abu Qudeiri, A. Ziout, M. Alsayyed, A. Alzarooni, F. Safieh, A. Al Hatti, et al., Simulation study of deep drawing process, in Materials Science Forum, 2020, 139-147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.977.139>
- [9] S. Tatipala, J. Pilthammar, M. Sigvant, J. Wall, and C. M. Johansson, Introductory study of sheet metal forming simulations to evaluate process robustness, in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 012111. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012111>
- [10] A. Zabala, E. S. de Argandoña, D. Cañizares, I. Llavori, N. Otegi, and J. Mendiguren, Numerical study of advanced friction modelling for sheet metal forming: Influence of the die local roughness, Tribology International, 165, 107259, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107259>
- [11] M. Ramezani and Z. Ripin, Introduction to sheet metal forming processes, Rubber-Pad Forming Processes—Technology and Applications, Elsevier, Amsterdam, 1-22, 2012.
- [12] Y. Qin, W. A. W. Nawang, and J. Zhao, Forming of micro sheet-metal components, in Micromanufacturing Engineering and Technology, ed, 2015, 299-322. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31149-6.00013-X>
- [13] O. Çavuşoğlu, S. Toros, H. Gürün, and A. Güral, Warm deformation and fracture behaviour of DP1000 advanced high strength steel, Ironmaking & Steelmaking, 45, 618-625, 2018. <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1309168>
- [14] J. Lian, F. Shen, X. Jia, D.-C. Ahn, D.-C. Chae, S. Münstermann, et al., An evolving non-associated Hill48 plasticity model accounting for anisotropic hardening and r-value evolution and its application to forming limit prediction, International Journal of Solids and Structures, 151, 20-44, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.04.007>
- [15] D. Banabic, Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation: Springer Science & Business Media, 2010.
- [16] B. Şener, T. A. Akşen, and M. Firat, On the effect of through-thickness integration for the blank thickness and ear formation in cup drawing FE analysis, European Mechanical Science, 5, 51-55, 2021. <https://doi.org/10.26701/ems.781175>





## İki tekerlekli denge robotunun PID ile kontrolü Control of two wheel balance robot with PID

Güçhan Taşlıalan<sup>1,\*</sup> , Orhan Erdal Akay<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 46050, Kahramanmaraş, Türkiye

### Öz

Yüksek hareket kabiliyetine sahip ergonomik tasarımı taşıtlara olan ihtiyaç son yıllarda giderek artmaktadır. Buna bağlı olarak, iki tekerlekli denge robotları, güncel yaşamımızdaki yerini, ticari olarak almıştır. Bu robotlar için denge temel problemdir. Buna bağlı olarak, araştırmacılar 40 yılı aşkın süredir ters sarkaç yaklaşımı altında, denge problemi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapmıştır. Ters sarkaç probleminde, hareket denklemleri doğrusal olmayan karmaşık denklemlerdir. Bu denklemlerin elde edilmesinde farklı dinamik yaklaşımlardan faydalanılmıştır. Çalışmada; iki serbestlik derecesine sahip olan, iki tekerlekli denge robotunun kinematik analizi gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan dinamik denklemleri lagrange yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve yalnızca açı dengesini kontrol eden bir PID kontrolörün bulunduğu bir blok diyagramının benzetim modeli yapılmıştır. Bir sonraki aşamada, denklemler yine Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı PID kontrolörün bulunduğu bir blok diyagramının benzetim modeli yapılmıştır. Benzetim modelleri incelendiğinde kontrol sistemlerinin çalıştığı görülmüştür. Açı geri beslemesine sahip kontrol sisteminde dengenin, açı/hız geri beslemeli kontrol sistemine göre 330 s daha kısa sürede sağladığı görülmüştür. Ayrıca, kararlı bir kontrol için PID kontrolörlerin kazanç katsayılarının en uygun değerlerde belirlenmesi gerektiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** İki tekerlekli denge robotu, Ters sarkaç, Lagrange yöntemi, Matlab, Robot

### 1 Giriş

Günümüz dünyasında, her geçen gün daha az enerji harcayan, daha az hacim kaplayan ve kullanımı kolay olan yeni taşıt tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun sonuçlarından biri olarak, 21. yüzyıl başlangıcından itibaren iki tekerlekli denge robotu literatürdeki yerini almıştır. İki tekerlekli denge robotu tüm dünyanın ilgisini çekmiştir ve günümüzde ticari bir boyut kazanmıştır. Bu nedenle büyük alışveriş merkezleri, otoparklar ve hastaneler gibi dar alanlarda yüksek hareket kabiliyeti gerektiren birçok yerde kullanılmaktadır. İki tekerlekli denge robotu, literatürde birçok çalışmanın konusu olmuş ve denge problemi, ters sarkaç yaklaşımı ile çözümlenmiştir. Ters sarkaç probleminde hareket denklemleri doğrusal olmayan

### Abstract

The need for ergonomically designed vehicles with high mobility has been increasing in recent years, that's why two-wheeled balance robots have taken their place commercially in our current life. Balance is the main problem for a two-wheeled balance robot, so researchers have carried out various studies on the balance problem under the title of inverted pendulum for more than 40 years. In the inverted pendulum problem, the equations of motion are complex nonlinear equations. Different dynamical approaches have been used to obtain these equations. In the study the kinematic analysis of the two-wheeled balance robot, which has two degrees of variance, was carried out and the nonlinear dynamical equations were obtained using the Lagrange method. The obtained equations were transferred to the Matlab-Simulink interface and a block diagram was simulated with a PID controller that only controls the angle balance. In the next step, the equations were transferred to the Matlab-Simulink interface and a block diagram was simulated with two separate PID controllers providing angle control and speed control. When the simulations were examined, it was seen that the control systems worked successfully. It has been observed that the balance in the control system with angle feedback is provided in less than 330 seconds compared to the control system with angle/velocity feedback. In addition, it has been seen that the gain coefficients of PID controllers should be determined at the most appropriate values for a stable control.

**Keywords:** Two wheel balance robot, Inverted pendulum, Lagrangian method, Matlab, Robot

karmaşık denklemlerdir. Bu denklemlerin elde edilmesinde Newton hareket kanunu, lagrange enerji yöntemi veya benzer dinamik yaklaşımlardan faydalanılmıştır. Ters sarkaç problemi çözümündeki elde edilen kazanımlar, araştırmacıların yeni çalışmalara yönelmesini sağlamıştır. İki tekerlekli denge robotunun çalışma prensibi, ters sarkaç problemi ile benzerdir. Bu nedenle ters sarkaç problemi, iki tekerlekli denge robotu için bir alt model olarak kabul edilmiştir.

Tsai ve Hu [1] çalışmalarında, lagrange yöntemiyle ters sarkaç problemi temelinde iki tekerlekli denge robotunun dinamik denklemlerini oluşturdular ve bu denklemleri kullanarak auto-balancing two-wheeled cart (ABTWC) isimli kontrol yaklaşımını benimsediler.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: guchantashlialan@gmail.com (G. Taşlıalan)  
Geliş / Recieved: 12.12.2021 Kabul / Accepted: 15.03.2022 Yayımlanma / Published: 15.04.2022  
doi: 10.28948/ngumuh.1026781

Su vd. [2] çalışmalarında, iki tekerlekli bir robot için akıllı yazılım mimarisi geliştirdiler. Buna göre; parametrik değişkenlik, doğrusal olmayan sürtünme, dış yükte bozulma gibi öngörülemeyen belirsizlikler için bulanık sinir ağına sahip bir denetleyici tasarladılar. Ayrıca, geleneksel PD kontrolöre sahip bir denetleyici de tasarladılar ve denetleyicilerin benzetim modelleri çalıştırılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırdılar.

Vermeiren vd. [3] çalışmalarında, iki tekerlekli bir prototipin modellenmesi ve kontrolüne ilişkin sonuçları sunulmuştur. Segway gibi B2 isimli araç da, esasen tekerlekleri ortak bir eksen paylaşıyor ve kendi kendini dengeleyen bir makinedir. Bununla birlikte, kontrol amaçları farklıdır; çünkü iki aracın kullanım amacı farklıdır. Segway ters sarkaç gibi davranır (örneğin: sürücü öne doğru eğildiğinde, Segway yolunun düşmesini önlemek için öne doğru hızlanır), oysa B2'nin görevi yolun ve yolcuların etkisini gözetmeden yolcuları taşımaktır. Ayrıca, B2 alternatif bir karayolu taşıtı olarak tasarlanmıştır ve kaldırımlarda kullanımı uygun değildir. Amacı, şehir merkezindeki araçların neden olduğu sorunları (kirlilik, gürültü, alan kullanımı) azaltmaktır.

Ghani vd. [4] çalışmalarında, iki tekerlekli robot için çizgi izleyici algoritmasının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Eğim açısı problemini çözmek için ortamdaki değişiklikler iki kızıl ötesi mesafe sensörü aracılığıyla belirlenmiş ve ortam değişikliklerini izlemek üzere denge kartındaki işlemci yongasından alınan verilere tepki vermesi amacıyla beyin kartı denetleyicisi "ATMEGA32" seçilmiştir.

Jung ve Lee [5] çalışmalarında, MIPS adı verilen robotun dengeleme ve navigasyon kontrolünü incelemişlerdir. MIPS, iki tekerlekli mobil bir robottur ve ters sarkaç problemi temelinde incelenmiştir. Dinamik denklemlerin kullanıldığı kontrol sisteminde; bir adet PD ve iki adet PID kontrolör kullanılmıştır.

Almeshal vd. [6] çalışmalarında, iki tekerlekli taşıtların yeni bir tasarımı ve buna bağlı bir stabilizasyon yaklaşımı sunulmuştur. Önerilen tasarım, aracın çalışma alanını genişletmesini sağlayan daha fazla serbestlik derecesi bakımından araca daha fazla esneklik sağlamıştır. Doğrusal aktüatör tarafından sunulan ek çeviri serbestlik derecesi (DOF), gerektiğinde farklı yükseklik seviyelerine ulaşmak için ekli bir yüke yardımcı olur. Sistemin modeli, hareket halindeki bir tabandaki çift ters sarkaç senaryosunu, eklenen DOF ile taklit eder. Sistemin dinamik denklemlerini elde etmek için lagrange yöntemi kullanılmıştır. Coulomb sürtünme modeline dayanan mafsallar, sistemin doğrusal olmayan özelliklerini koruyacak şekilde göz önünde bulundurulmuştur. Sistemin dengelenmesi için bir PD-PID sağlam kontrol yaklaşımı türetilmiştir. Eklemlere bağlı sönümleme sisteminin kararlılığı üzerindeki etkisinin araştırılması yapılmıştır. Modeli ve kontrol yaklaşımını doğrulayan benzetim modeli sonuçları sunulmuş ve tartışılmıştır.

Adeel vd. [7] çalışmalarında, önceden belirlenmiş pozisyon etrafında pozisyonunu dengeleme yeteneğine sahip özerk bir çift tekerlekli kendini dengeleme robotu geliştirilmiştir. Başlangıçta sistem doğrusal değildir ve kararsızdır. Sistemin fiziksel yapısını PID kontrolörü

kullanarak yeniden tasarladıktan ve matematiksel modellemeyi kullanarak dinamik davranışını analiz ettikten sonra sistemin kararlı hale geldiği görülmüştür. Kendi kendini dengeleyen robotun konumu PID denetleyicisi tarafından kontrol edilmiştir. PROTEOUS, MATLAB ve VM programları kullanılarak robotun benzetim modelleri çalıştırılmıştır ve sonuçları incelenmiştir.

Son ve Anh [8] çalışmalarında, doğrusal olmayan belirsiz bir model ile iki tekerlekli elektrikli scooter için uyarlanabilir bir geri tepme kontrol yasasını incelemişlerdir. Adaptif geri tepme kontrolü, Lyapunov istikrarını sağlayan geri bildirim kontrolü ile entegre edilmiştir. Kontrol edilen fonksiyonu bulmak ve belirsiz parametreleri tahmin etmek için özyinelemeli yapıyı kullanarak; uyarlamalı bir geri adım atma yöntemi, eScooter'ın kendi kendini dengeleyen kontrol ünitesini verimli bir şekilde kontrol eden bir geri besleme kontrol yasasını oluşturmuşlardır. Ek olarak, eScooter'ın modülleri arasında iletişim kurmak için yüksek güvenilirliğe sahip bir kontrolör alanı ağı (CAN bus) uygulamışlardır.

Hirata ve Murakami [9] çalışmalarında, iki tekerlekli denge robotu alt yapısına sahip iki tekerlekli bir sandalye sistemini incelemişlerdir. Kontrolör olarak ise Lyapunov kontrol yaklaşımını benimseyerek benzetim modeli ve deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

Çelik [10] çalışmasında, iki tekerlekli denge robotunun dinamik modelinin belirlenmesi hususunda lagrange enerji metodundan yararlanmıştır. Elde ettiği nonlineer modelleri Matlab/Simulink ortamında blok diyagramlarına aktarmıştır. Oluşturulan modeller için Matlab/Simulink ortamında PID ve model öngörülü kontrol (MPC) kontrolcülerini tasarlayarak benzetim modelleri karşılaştırmıştır.

Kara [11] çalışmasında, iki tekerlekli robot üzerine tek bir kol yerleştirilmiştir. Kol sayesinde robota gerçek zamanda harici ve dâhili bozucu etken uygulanırken, Katsayı Diyagram Metodu (KDM) denetimcisi ile sistemin açısal dengesi ve doğrusal yer değiştirme kontrolü sağlanmıştır.

Dai vd. [12] çalışmalarında, sürtünme telafisine sahip iki tekerlekli bir ters sarkaç (TWIP) robotunun tasarım ve uygulama yöntemini tanıtmışlardır. Tahrik mekanizmasındaki sürtünme, robotun kendi kendini dengelemesinin kritik bir faktörüdür ve performansını etkiler. Sürtünme parametreleri, tahrik mekanizmasının dinamik modeline göre tanımlanmıştır. Tüm robot sisteminin dinamikleri lagrange metodu ile elde edilmiş ve robot tahrik mekanizması sürtünmesi hesaba katılmıştır. TWIP robotu doğrusal olmayan bir sistem olarak bağlanmış olmasına rağmen, kendini dengeleme ve yalpalama hareketi için kayan mod kontrol cihazları bağımsız olarak tasarlanmıştır.

Velazquez vd. [13] çalışmalarında, kendi kendini dengeleyen bir aracın dengeleme, hız ve hareket kontrolünü incelemişlerdir. Hem dengeleme kontrolü hem de açısal hız kontrolü için kademeli bir kontrol cihazı uygulamışlardır. Bu kontrolör, sistemin önerilen matematiksel modelini kullanarak benzetim modelleri test edilmiştir. Kontrol donanımı, önerilen kontrol cihazlarını uygulamak için tasarlanmış ve entegre edilmiştir.

Junoh [14] çalışmasında; iki tekerlekli bir denge modeli üzerine PID kontrol uygulanmıştır. Dengenin sağlanmasından sonra PID kazanç katsayıları ile oynayarak daha stabil bir

denge elde etmeye çalışmıştır. Sonuç olarak, farklı kazanç katsayıları ile farklı denge eğrileri elde edildiğini görmüş ve stabil bir denge için optimum kazanç katsayılarını belirlemiştir.

İlgen vd. [15] çalışmalarında, çok tekerlekli bir benzetim modelinin geliştirilmesi ve tek tekerlekli bir ters sarkacın dengelenmesinin kontrolü amaçlanmıştır. Sistemin sanal bir prototipi Adams yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Model, Matlab ve Adams yazılımında birlikte simüle edilmiştir. Adams modelinde iki giriş (bozulma ve kontrol) ve iki çıkış (sarkaç açısı ve tekerlek konumu) bulunmuştur. PID kontrolör, sarkaç açısının dengeleme kontrolü ile benzetim modeli için tasarlanmış ve uygulanmıştır.

Hirose vd. [16] çalışmalarında, bagaj taşıyabilen ve insanı takip edebilen iki tekerlekli ters sarkaç kontrolüne sahip kişisel bir robotu incelediler ve insanı takip eden bir robot için yeni bir kontrol yaklaşımı önerdiler. Önerilen yaklaşım, kişisel bir robotun ihtiyaç duyacağı çeşitli üst ve alt seviye kısıtlamalarının dikkate alınmasını kolaylaştıran bir model öngörücü kontrol kullanılmıştır.

Jeong vd. [17] çalışmalarında, ters sarkaç problemi tekniğini kullanan kişisel mobil robotları incelemişlerdir. Yapılan benzetim modellerinde fren durumunda gövdenin tepki davranışı incelenerek elde edilen veriler not edilmiş ve bu veriler ışığında geri tepme davranışındaki tepme kuvvetinin diferansiyel değerini kullanan olası bir acil fren destek kontrolü önerilmiştir.

Yavuz vd. [18] çalışmalarında, iki tekerlekli kendini dengeleyen robotun tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı gerçekleştirilen robot üzerinde kontrolcü uygulamasında geri besleme verilerini elde edebilmek için ivmeölçer ve gyro sensörü kullanmışlardır. Sensörlerden elde edilen veriler ile robotun açısız pozisyonu kontrol edilmeye çalışılmıştır. Tasarım üzerine üç farklı kontrol algoritması (PI kontrol, PD kontrol ve PID kontrol) uygulanmıştır.

Park ve Cho [19] çalışmalarında, kontrol momenti jiroskop modülüne dayanan iki tekerlekli kendini dengeleyen bir mobil robotu tanıtmışlardır. Dengesini korumak için, iki tekerlekli robotun tekerlek hareketlerini kullanması gerekir. Beklenmedik bir rahatsızlık robotu etkilediğinde, robot tekerleklerin hareketleri ve gövdenin eğilmesiyle dengesini korur. Rahatsızlık robotun tepki yeteneğini aşarsa, robot dengesini kaybeder. Bu sorunları çözmek için, hareketi en aza indirirken dengeyi iyileştirmek için kontrol momenti jiroskop modülü ile bir robot tasarlanmıştır. Robota bir rahatsızlık uygulandığında, rahatsızlığın bir gözlemci tarafından tahmin edildiği öngörülür ve kontrol momenti jiroskop denetleyicisi rahatsızlığı telafi eder. Kontrol momenti jiroskop modülünü kullanarak robot, tekerleklerinin sadece küçük hareketleriyle dengeyi koruyabilmektedir.

Jeong ve Hayashi [20] çalışmalarında, ters sarkaç problemi temelinde iki tekerlekli bir robotu incelemişlerdir ve sağlam yük pozisyonu yaklaşımı ile yatay duruş pozisyonunda tutma sağlayan paralel dört çubuk mekanizmasını benimseyen bir ters sarkaç modeli önermişlerdir. Bu platformun temel yapısı, iki ön ve arka ters sarkaçları ve dört çubuklu paralel bir bağlantı mekanizması

görevi görecek şekilde serbest dönüşlü bağlantıları olan iki üst ve alt çubuktan oluşur. Paralel mekanizmanın özelliklerine dayanarak, platform çeşitli bozucu etkenler altında dengeleme hareketi sırasında üst çubuğun yatay duruşunu koruyabilir. Mobil platformun hareket denklemleri, üst çubuktaki yükleme koşulundaki bir değişikliğin, dengeleme benzetim modelleri ile onaylandığı gibi dengeleme özelliklerini etkilemediğini göstermiştir.

Gandarilla vd. [21] çalışmalarında, iki serbestlik dereceli kendini dengeleyen bir robotu sürmek için ara bağlantı ve sönümlendirme ataması pasivitesine dayalı kontrol (IDA-PBC) tekniğini incelemişlerdir. Kontrol sistemi tasarımı, kararlılık analizi ve çekim alanının tahmini ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Değişkenlerin uygun bir şekilde değiştirilmesi ve eşleşen denklemlerin uygun bir şekilde ele alınması, kontrol yasalarının tasarlanması ve sırasıyla asimptotik stabilize analizinin yapılması için anahtar olmuştur. Arzu edilen potansiyel enerji için farklı önerilerin kapalı devre halindeki kendi kendini dengeleyen robotun davranışını nasıl şekillendirdiğini vurgulamak için kontrol ünitesinin tasarımında iki skalar fonksiyon kullanılmıştır. Teorik öneriyi onaylamak ve önerilen kontrol yasasının düzenleme görevindeki performansını ve dış rahatsızlıklara karşı pratik sağlamlığı göstermek için deneysel sonuçlar sunulmuştur.

Taşhan ve Akay [22] çalışmalarında, iki tekerlekli denge robotunun dengesinin sağlanabilmesi için herhangi bir dinamik denklem modeli kullanılmamış, bunun yerine doğrudan açı geri beslemeli bir PD kontrolör tasarlanmış ve blok diyagramı oluşturulmuştur. PD kontrolör, Working Model2D (WM2D) ara yüzünde test edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, 2 serbestlik derecesine sahip dinamik bir yapıdadır ve teorik çalışmalar uygulamaya aktarıldığında ivme ölçer, açı ölçer vb. sensör ekipmanlarından faydalanılır. Araştırmacılar benzer argümanlar ile farklı disiplinlerde de çalışabilmektedir. Fakat, araştırmaların nihai amacı insan hayatını kolaylaştırmaktır.

Kacar vd. [23] çalışmalarında, kendi kendini dengeleyebilen bir bisiklet için bir tasarım çalışması yapılmıştır. Ayrıca düşmesi durumunda denge konumuna getirmek için destek ve kaldırma sistemleri eklenmiştir. Sonlu eleman benzetim modeli yapılarak, bisiklet çerçevesinin dinamikleri ve yapısal tepkileri elde edilmiştir. Netice olarak, kendi kendini dengeleme özelliğine sahip otonom bir bisiklet tasarlanmıştır. Kendinden dengeleme, tek eksenli bir gimbal içeren kontrol torku jiroskopu ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımın performansı değişen yükleme, sürüş hızı ve sürüş torku açısından değerlendirilmiştir.

Sunulan çalışmada, iki serbestlik derecesine sahip olan, iki tekerlekli bir denge robotunun kinematik analizi gerçekleştirilmiş ve doğrusal olmayan dinamik denklemleri elde edilmiştir. Kinematik analiz, klasik bir dinamik problemi olan ters sarkaç problemi yaklaşımı ile lagrange metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lagrange metodu ile elde edilen dinamik denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve iki tekerlekli denge robotunun sadece açı dengesini kontrol eden bir PID (Proportional, Integral, Derivative) kontrolör tasarlanarak benzetim modeli yapılmıştır. Bir sonraki adımda dinamik denklemler yine

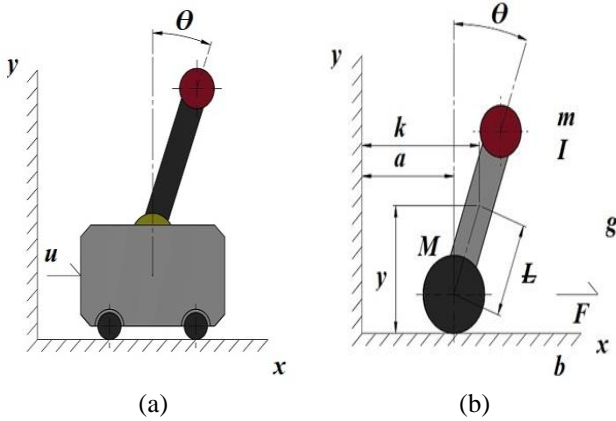


Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı PID kontrolörün tek bir blok diyagramına entegre edildiği yeni bir benzetim modeli yapılmıştır. Benzetim modelleri çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

## 2 Materyal ve metot

### 2.1 Kinematik model

Ters sarkaç probleminin serbest cisim diyagramı en genel haliyle Şekil 1(a)'da verilmiştir. Şekil 1(b)'de ise iki tekerlekli denge robotuna ait serbest cisim diyagramı verilmiştir. Serbest cisim diyagramları incelendiğinde her iki modelin de dinamik yapısının benzer olduğu görülür. Dinamik denklemlerin elde edilmesinde çeşitli yöntemler kullanılır. Bu çalışmada, dinamik denklemlerin elde edilmesi için lagrange yöntemi kullanılmıştır. Lagrange yöntemi ile elde edilen dinamik denklemler Matlab-Simulink ara yüzüne aktarılmış ve açı kontrolü ile hız kontrolü sağlayan iki ayrı blok diyagramı tasarlanarak benzetim modelleri test edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, gövde ve tekerlek olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Bu sayede, ayrı ayrı matematiksel tanımlamalar yapılabilmiş ve sonrasında bağıntılar birleştirilmiştir. İlk parça gövdenin olduğu kısım ve ikinci parça da tekerleğin olduğu kısım.



Şekil 1. (a) Ters sarkaç serbest cisim diyagramı, (b) İki tekerlekli denge robotu ters sarkaç serbest cisim diyagramı

Tablo 1'de iki tekerlekli denge robotunun kinematik ve dinamik analizi için gereken parametreler verilmiştir. Bu parametrelerin sayısal değerleri ileride çalışılması planlanan deneysel sisteme göre belirlenmiştir.

Lagrange yönteminde, kinetik ve potansiyel enerjiler kullanılmaktadır. Toplam kinetik enerji, ötelemeden kaynaklanan kinetik enerjiler ile dönmeden kaynaklanan kinetik enerjilerin toplamıdır. Denklem (1)'de en genel haliyle toplam kinetik enerji ifadesi verilmiştir. Buna göre tekerleğin ve gövdenin kinetik enerjileri ayrı ayrı belirlenmiştir. Gövdenin; düşey eksen ve yatay eksen hareketi bulunduğu için, hem ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi hem de dönmeden kaynaklı kinetik enerjisi bulunur. Tekerleğin ise düşey eksen hareketi bulunmadığı için yalnızca yatay eksen ötelemeden kaynaklı kinetik enerjisi bulunur.

Tablo 1. İki tekerlekli denge robotu parametreleri

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
$k$	Sabit eksen takımına göre gövdenin yatayda yaptığı yer değiştirme	-	-
$y$	Sabit eksen takımına göre gövdenin düşeyde yaptığı yer değiştirme	-	-
$\theta$	Gövdenin y eksenine göre yaptığı açı	-	-
$a$	Arabanın kütle merkezi ile sabit eksen takımının y eksenine göre uzaklığı	-	-
$F$	Arabaya x doğrultusunda etkiyen harici kuvvet	-	-
$M$	Tekerlek kütlesi	3	kg
$m$	Gövde kütlesi	15	kg
$g$	Yer çekimi ivmesi	9.81	m/s <sup>2</sup>
$L$	Gövde kütle merkezi ile çubuk bağlantı noktası arasındaki uzaklık	0.0125	m
$I$	Gövdenin atalet momenti	0.000078 5398	m <sup>4</sup>
$b$	Tekerlek ile yer arasındaki sürtünme katsayısı	0.90	-

Bu varsayımlar ışığında robotun toplam kinetik enerji bağıntısı Denklem (2)'deki gibi elde edilmiştir.

$$T = \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} I_i \omega_i^2 \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{k}^2 + \frac{1}{2} m \left[ \dot{k}^2 + 2\dot{k}\dot{\theta} \cos \theta + \dot{\theta}^2 \right] + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

Lagrange yönteminde bulunan kinetik-potansiyel (L) yazılabilmesi için robotun toplam potansiyel enerjisinin de belirlenmesi gerekir. Denklem (3)'de en genel haliyle toplam potansiyel enerji ifadesi verilmiştir. Buna göre tekerleğin ve gövdenin potansiyel enerjileri ayrı ayrı belirlenmiştir. Tekerleğin düşey eksen hareketi bulunmadığı varsayıldığından potansiyel enerjisi sıfırdır. Toplam potansiyel enerji gövdenin ve tekerleğin potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Buna göre, tekerleğin potansiyel enerjisi sıfır olduğu için iki tekerlekli denge robotunun toplam potansiyel enerjisi gövdenin potansiyel enerjisine eşittir. Gövdenin potansiyel enerjisi, denge konumunun potansiyel enerjisinin sıfır olması varsayımı ile yazılır. Denklem (4), iki tekerlekli denge robotunun en genel potansiyel enerji bağıntısıdır.

$$V = m_i g_i h_i \quad (3)$$

$$V = m g (1 - \cos \theta) \quad (4)$$

Lagrange yöntemindeki kinetik-potansiyel (L) ifadesi, robotun kinetik ve potansiyel enerjilerinin farkıyla elde edilir. Denklem (5)'de kinetik-potansiyel bağıntısı verilmiştir.

Gerekli düzenlemeler yapıldığında iki tekerlekli denge robotunun kinetik potansiyel ifadesi olan **Denklem (6)** elde edilir.

$$L = T - V \quad (5)$$

$$L = \ll \left[ \frac{1}{2} M \dot{k}^2 \right] + \frac{1}{2} m [\dot{k}^2 + 2k\dot{\theta} \cos \theta + I \dot{\theta}^2] + \left[ \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \right] \gg -[mg_1(1 - \cos \theta)] \quad (6)$$

Lagrange denkleminin en genel hali **Denklem (7)**'de verilmiştir. İki tekerlekli denge robotu iki serbestlik derecesine sahiptir. Bu nedenle, iki ayrı genelleştirilmiş koordinat takımına (k ve  $\theta$ ) göre çözümlenerek iki ayrı hareket denklemi elde edilir. Gerekli ara işlemler yapıldıktan sonra elde edilen hareket denklemlerinin en genel hali **Denklem (8)** ve **Denklem (9)**'da verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\delta L}{\delta q_i} \right) = Q_i \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{k}} \right) = (M + m)\ddot{k} + m_1 \cos \theta \ddot{\theta} - m_1 \sin \theta \dot{\theta}^2 \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) = (m_1^2 + I)\ddot{\theta} + m\dot{k} \cos \theta - m\dot{k}\dot{\theta} \sin \theta \quad (9)$$

## 2.2 Dinamik model

**Denklem (8)** k genelleştirmesine göre düzenlenirse, **Denklem (10)** elde edilir. Bu denklem içerisindeki "u" ifadesi, korunumlu olmayan dış kuvvetleri temsil etmektedir. Gerekli düzenlemeler yapıldığında iki tekerlekli denge robotunun 1. hareket denklemini olan **Denklem (11)** elde edilir. **Denklem (8)**  $\theta$  genelleştirmesine göre düzenlenirse, **Denklem (12)** elde edilir. Gövdeye dışarıdan bir kuvvet etki etmediği için bu denklem sifıra eşittir. Aynı şekilde gerekli düzenlemeler yapıldığında iki tekerlekli denge robotunun 2. hareket denklemini olan **Denklem (13)** elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{k}} \right) - \left( \frac{\delta L}{\delta k} \right) = u \quad (10)$$

$$\ddot{k} = \frac{F - b\dot{k} - m_1 \cos \theta \ddot{\theta} + m_1 \sin \theta \dot{\theta}^2}{(M + m)} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) - \left( \frac{\delta L}{\delta \theta} \right) = 0 \quad (12)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{mg_1 \sin \theta + 2m\dot{k}\dot{\theta} \sin \theta - m\dot{k} \cos \theta}{(m_1^2 + I)} \quad (13)$$

## 2.3 Kontrol

İki tekerlekli denge robotu için iki farklı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu yüzden iki ayrı blok diyagramı oluşturulmuştur. Birinci blok diyagramında; dinamik denklemler kullanılarak, Matlab/Simulink programında açı geri beslemesine sahip bir PID kontrolcü tasarlanmıştır. İkinci blok diyagramında ise; yine Matlab/Simulink programında dinamik denklemler kullanılarak, açı ve hız geri beslemesine sahip iki ayrı PID kontrolcü tasarlanmış ve tek bir blok diyagramına entegre edilmiştir. Elde edilen dinamik denklemler doğrusal olmayan (nonlinear) denklemlerdir. Bu dinamik denklemler literatürdeki çalışmaların genelinden farklı olarak doğrusallaştırılmadan kullanılmıştır. Matlab/Simulink programı doğrusal olmayan denklemleri çözümlenebildiği için; elde edilen denklemler, doğrusallaştırma (lineerleştirme) uygulanmadan kullanılmıştır. İki tekerlekli denge robotu modelinde; bir açıölçer sensör, tekerleklere tahrik veren motorlar ile kontrolcü sensör, robot gövdesinin düşey eksen ile yaptığı açı bilgisini sürekli olarak kontrolcüye bildirir. Kontrolcü ise sensörden gelen açı bilgilerini işleyerek tahrik motorlarına, mevcut konuma göre dengenin sağlanabilmesi ve robotun istenilen referanslara yönelebilmesi için gereken motor torku değeri ile motor dönüş yön bilgisini sürekli olarak bildirir. Bu sayede robot, istenilen referansa dengeli bir şekilde ilerler.

### 2.3.1 PID kontrol

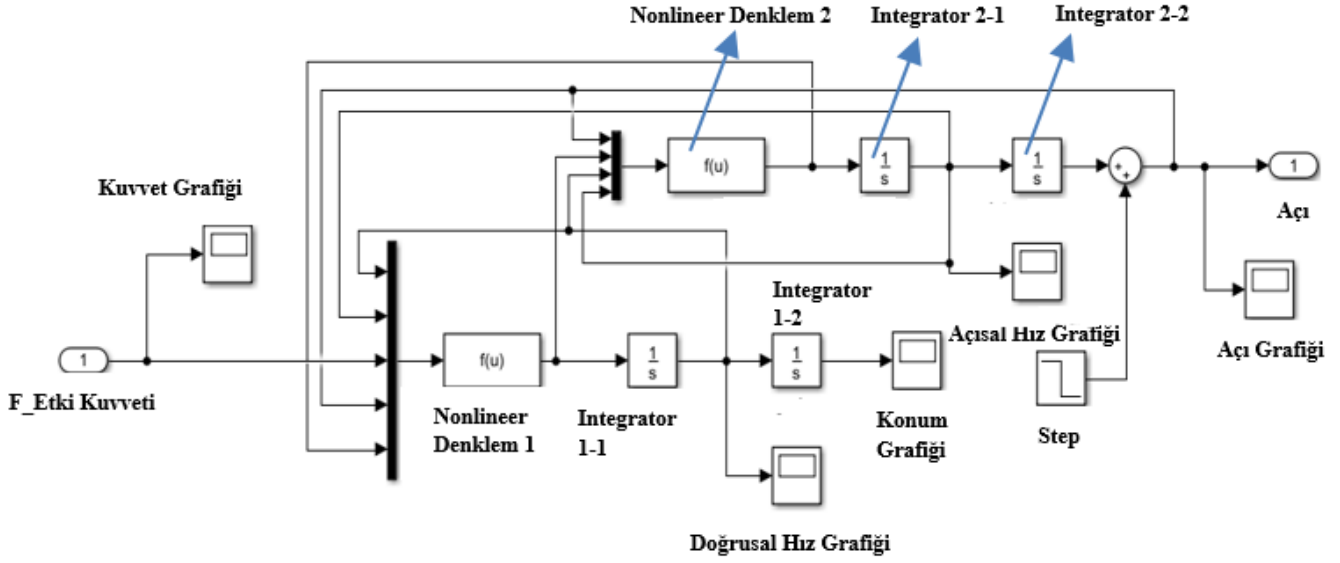
PID, oransal-integral-türevsel kontrol döngüsü yöntemidir ve yaygın olarak kullanılan bir geri besleme denetleyicisidir. PID denetleyici sürekli olarak, referans değer ile mevcut değer arasındaki farkı temsil eden hata değerini hesaplar. Bunun sonucunda denetleyici kontrol girdisini ayarlayarak hatayı ortadan kaldırmaya çalışır. **Denklem (14)** ve **Denklem (15)**'de sırasıyla PID kontrolörün genel denklemini ve e(t) hata fonksiyonu verilmiştir. Burada;  $k_p$  oransal kazanç katsayısı,  $k_i$  integral kazanç katsayısı,  $k_d$  türevsel kazanç katsayısı ve e(t) hata fonksiyonudur. Kazanç katsayıları, deneme yanılma yoluyla veya çeşitli programlar kullanılarak en uygun değerlerde belirlenir.

$$PID(s) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (14)$$

$$(t) = \text{referans değer} - \text{gerçekleşen değer} \quad (15)$$

### 2.3.2 Açı geri beslemeli kontrol

Bu kontrol sisteminde, iki tekerlekli denge robotunun yalnızca gövde açısı kontrol edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, iki serbestlik derecesine sahip olduğundan hareketinin matematiksel olarak çözümlenebilmesi için iki ayrı hareket denklemine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, **Denklem (11)**'i ve **Denklem (13)**'ü temsil eden, nonlinear **Denklem 1 ve 2**, **Şekil 2**'de görülen blok diyagramı içine gömülmüştür. Burada, etki kuvveti (F) girdisi ve bir açı çıktısı bulunur. PID kontrolör, referans açı ile mevcut açı arasındaki farkı kullanarak, Matlab/Simulink içerisinde bulunan PID Tuning aracı ile en uygun kazanç katsayılarını üretir



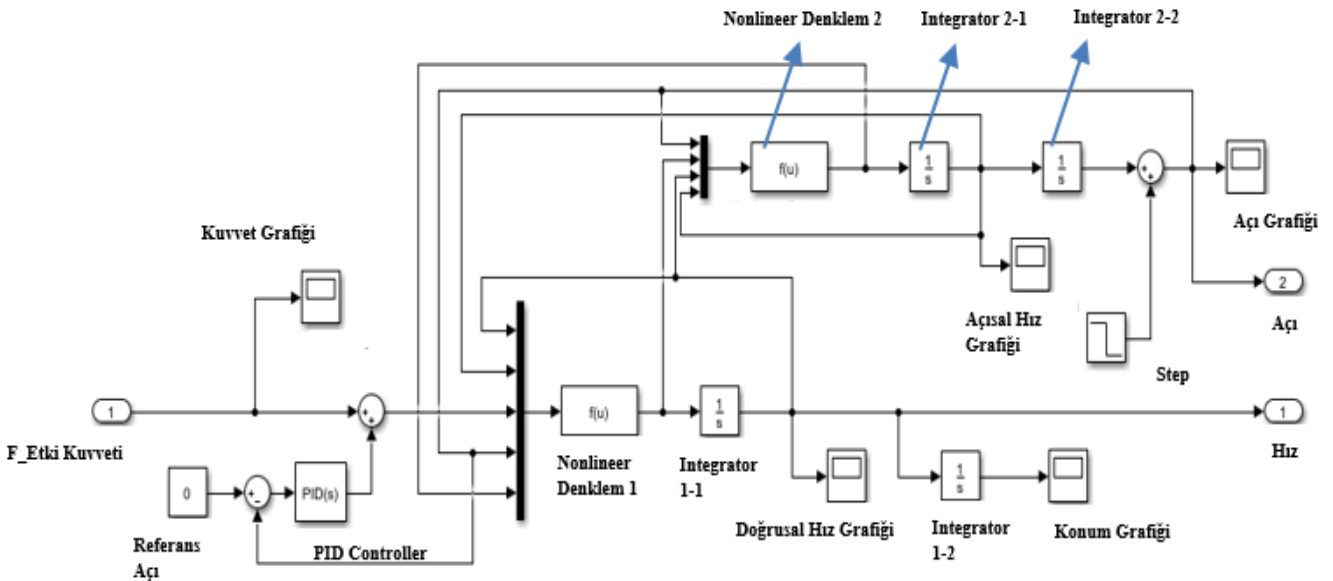
Şekil 2. Açılı geri beslemeli blok diyagramı

Benzetim modeli çalıştırıldığında iki tekerlekli denge robotunun açısal dengesini koruyabildiği görülmüştür.

### 2.3.3 Açılı ve hız geri beslemeli kontrol

Bu kontrol sisteminde, iki tekerlekli denge robotunun gövde açısı ve hızı kontrol edilmiştir ve yalnızca açı geri beslemesine sahip kontrol sistemi modeline benzerdir. Açılı ve hız geri beslemesine sahip kontrol sisteminde, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, PID kontrolörler 2 katmanda seri olarak blok diyagramı içerisine yerleştirilmiştir. İç katmanda bulunan PID kontrolör açı sapmasını kontrol etmektedir. Dış katmanda bulunan PID kontrolör ise gövdenin yön ve hız sapmasını kontrol etmektedir. Burada amaç, hem açı dengesinin sağlanması hem de yön ve hız kontrolünün yapılmasıdır. Şekil 3'de bu

kontrol sisteminde ait blok diyagramı verilmiştir. İki tekerlekli denge robotu, iki serbestlik derecesine sahip olduğundan hareketinin matematiksel olarak çözümlenebilmesi için iki ayrı hareket denklemine ihtiyaç duyulur. Bu nedenle, Denklem (11)'i ve Denklem (13)'ü temsil eden, nonlinear Denklem 1 ve 2, Şekil 3'de görülen blok diyagramı içine yine gömülmüştür. Burada, etki kuvveti (F) girdisi, bir açı çıktısı ve bir hız çıktısı bulunur. PID kontrolör, hem referans açı ile mevcut açı arasındaki farkı kullanarak, hem de referans hız ile mevcut hız arasındaki farkı kullanarak Matlab/Simulink içerisinde bulunan PID Tuning aracı ile en uygun kazanç katsayılarını üretir. Benzetim modeli çalıştırıldığında iki tekerlekli denge robotunun açısal dengesini koruyabildiği, referans hızda ve referans yönde ilerleyebildiği görülmüştür.



Şekil 3. Açılı ve hız geri beslemeli blok diyagramı

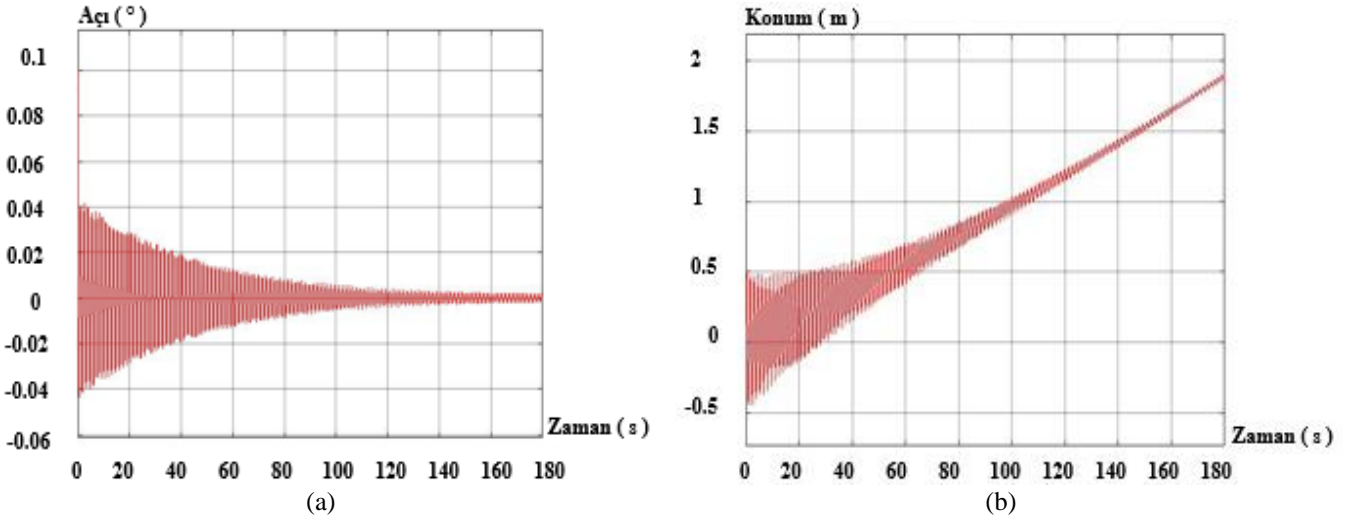
### 3 Bulgular

#### 3.1 Açık geri beslemeli kontrol benzetim modeli

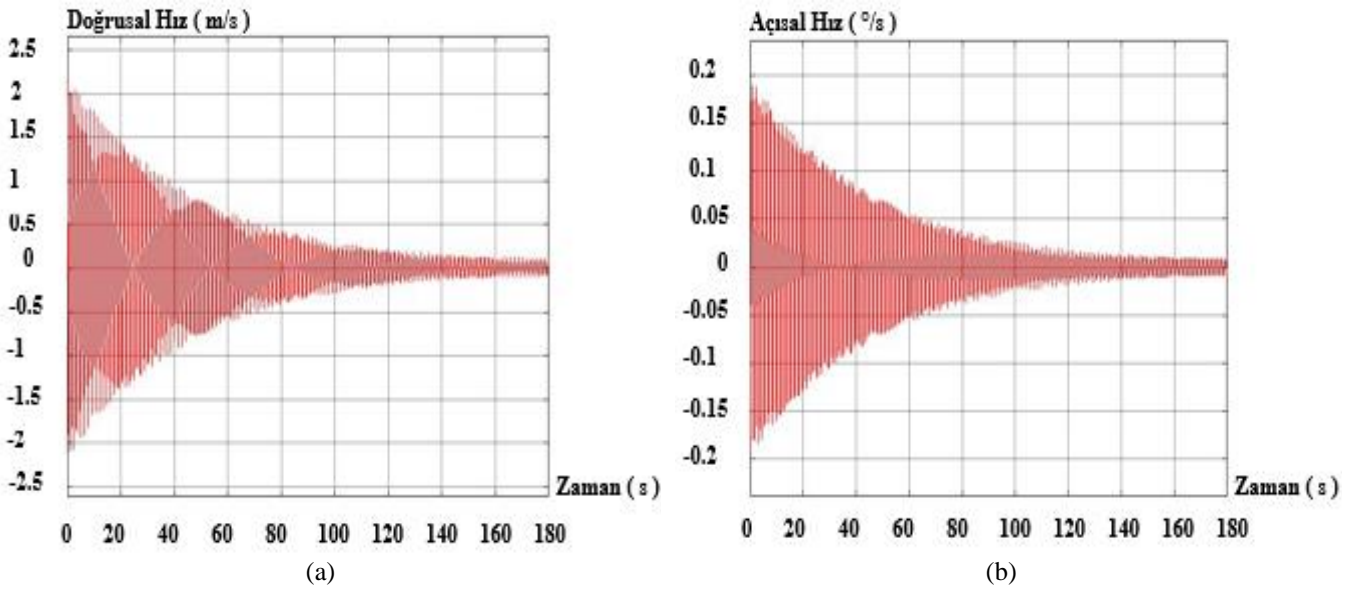
Benzetim modeli çalıştırıldığında, iki tekerlekli denge robotunun dengesini sağlayabildiği görülmüştür. Şekil 4(a)'da benzetim modeli sırasındaki açısal değişimi gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareket başladıktan 120 s sonra  $0.01^\circ$ 'den daha az salınımlarla dengenin sağlanabildiği ve maksimum sapmanın  $0,1^\circ$  olduğu görülür. Şekil 4(b)'de gövdenin konum değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareket başladıktan sonraki ilk 20 s'de mevcut konumu koruma eğilimi olduğu görülür. Bu süre zarfında gövde, ileri geri 0.5 m mesafede salınım hareketi yapmıştır. 20. s'den sonra gövde, daha küçük mesafelerde salınım hareketi yapmasına karşın kontrolsüz olarak ileri yönde yol almıştır. Şekil 5(a)'da gövdenin doğrusal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir.

Grafik incelendiğinde; meydana gelen salınım hareketinin, konum değişim grafiğindeki veriler ile uyduğu görülür. Hareket boyunca yapılan salınım hareketlerinin neden olduğu ileri geri yönelme durumu, bu grafikteki pozitif ve negatif ifadeler ile teyit edilmiştir. Gövde, 160. s'den sonra  $0.01 \text{ m/s}$ 'den daha az salınımlar yaparak yol almıştır. Şekil 5(b)'de gövdenin açısal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; elde edilen verilerin diğer grafikler ile uyduğu görülür. İlk hareket başladığında maksimum  $0.2^\circ/\text{s}$  limitinde olan açısal hız salınımının giderek azaldığı ve 140. s'den sonra  $0.01^\circ/\text{s}$  limitine düştüğü görülür. Yani gövde dengesini sağlarken çok az titreşime maruz kalmıştır.

Bu kontrol sisteminde gövde dengesini sağlayabilmiştir, fakat; bir yön ve hız kontrolüne sahip olmadığından kontrolsüz bir şekilde yol almıştır.



Şekil 4. Açık geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) açı değişimi, (b) konum değişimi



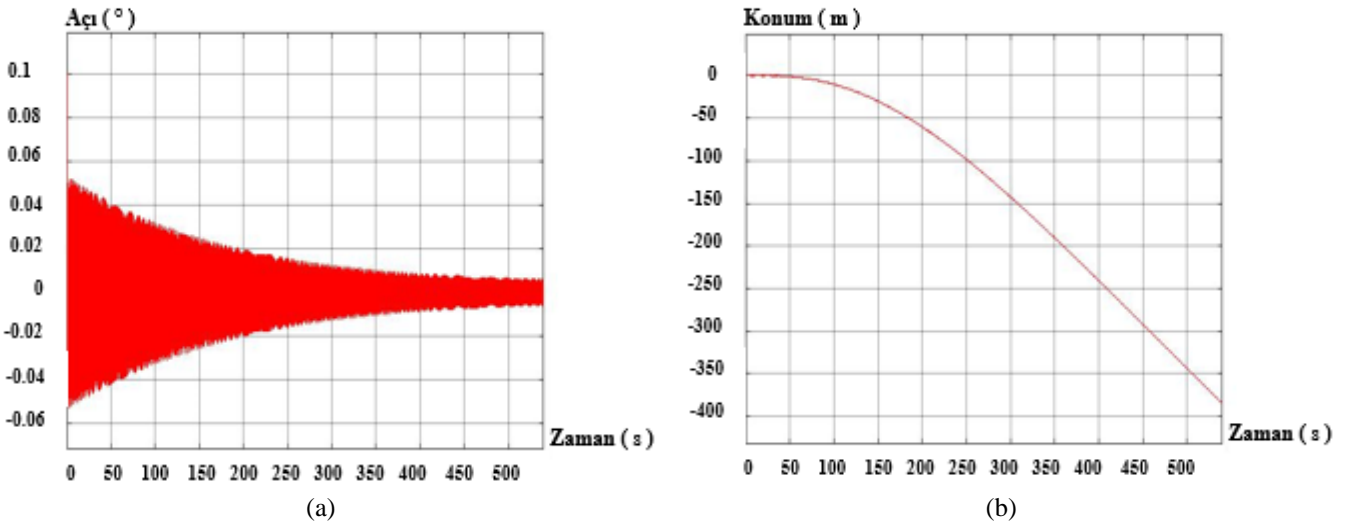
Şekil 5. Açık geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) doğrusal hız değişimi, (b) açısal hız değişimi



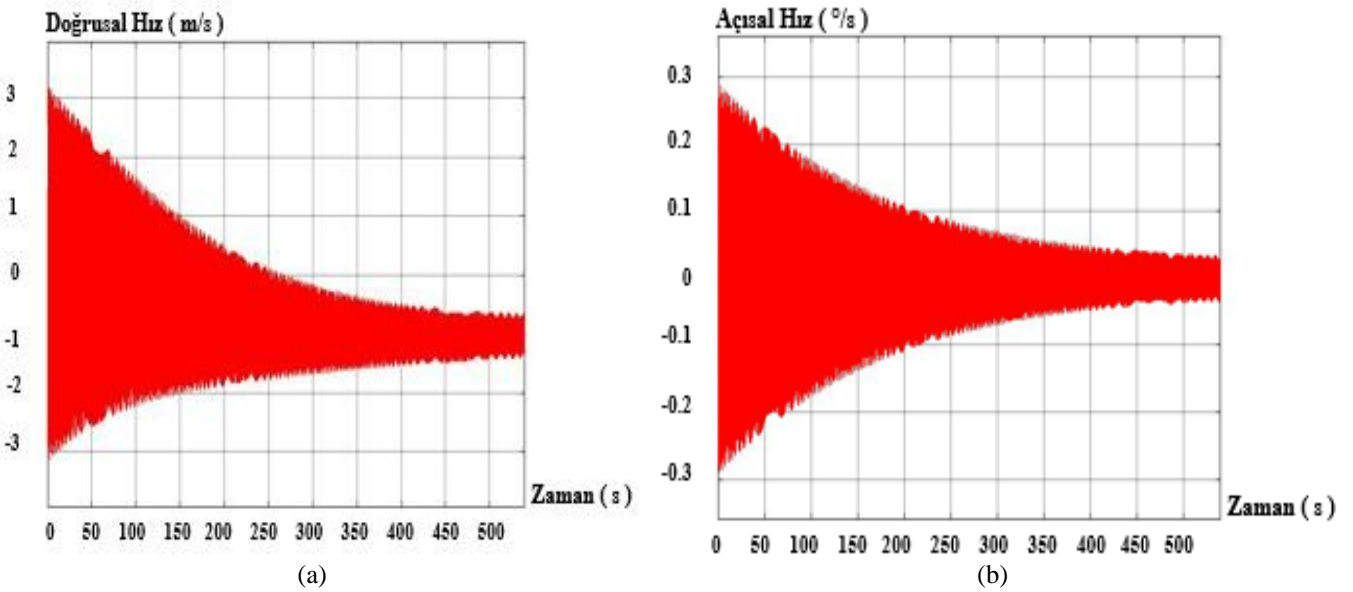
### 3.2 Açılı ve hız geri beslemeli kontrol benzetim modeli

Bu benzetim modelinde gövde için referans verilen hız negatif yönde 1 m/s'dir. Benzetim modeli çalıştırıldığında, iki tekerlekli denge robotunun hem dengesini sağlayabildiği hem de referans verilen yön ve hızda ilerleyebildiği görülmüştür. Şekil 6(a)'da benzetim modeli sırasındaki açısal değişimi gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareket başladıktan 450 s sonra 0,01°'den daha az salınımlarla dengenin sağlanabildiği ve maksimum sapmanın 0.1° olduğu görülür. Şekil 6(b)'de gövdenin konum değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; hareketin başlangıcından itibaren gövdenin referansa uygun olarak negatif yönde yol aldığı görülür. Şekil 7(a)'da gövdenin doğrusal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; meydana gelen salınım hareketinin, konum değişim grafiğindeki veriler ile

uyuştuğu görülür. Gövdenin harekete başladığı andan itibaren referans verilen negatif yönde, referans verilen 1 m/s hızına ulaşmak için salınım hareketi yaptığı görülür. En büyük sapma değeri hareketin ilk anlarında meydana gelmiştir ve 3 m/s limitindedir. Gövde hızı 500 s'den sonra referans verilen -1 m/s değerini yakalamıştır ve yaklaşık olarak 0.2 m/s 'lik sapmalar ile salınım hareketi yaparak hareketine devam etmiştir. Şekil 7(b)'de gövdenin açısal hız değişimini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde; elde edilen verilerin diğer grafikler ile uyduğu görülür. İlk hareket başladığında maksimum 0.3°/s limitinde olan açısal hız salınıminin giderek azaldığı ve 500 s'den sonra 0.01°/s limitine düştüğü görülür. Yani gövde dengesini sağlarken çok az titreşime maruz kalmıştır. Bu kontrol sisteminde gövde dengesini sağlamış, referans verilen yön ve hızda kontrollü olarak yol almıştır.



Şekil 6. Açılı ve hız geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) açı değişimi, (b) konum değişimi

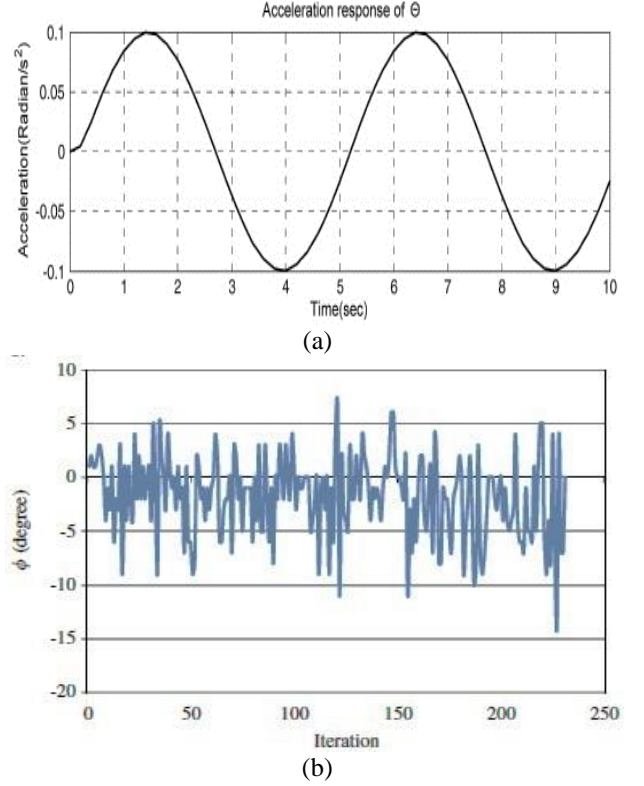


Şekil 7. Açılı ve Hız geri beslemeli kontrol benzetim modeli grafikleri; (a) doğrusal hız değişimi, (b) açısal hız değişimi

#### 4 Sonuçlar ve tartışma

Literatür incelendiğinde, farklı dinamik yaklaşımlar ile beraber sunulan çalışmaya benzer yaklaşımlar da görülür. Dinamik denklemlerin elde edilmesinde Lagrange metodunun seçilmesinin nedeni en genel ve en sık kullanılan metod olmasıdır. İki tekerlekli denge robotu için ters sarkaç problemi temel alınmıştır. Yeni yaklaşımlar ile denge problemine yeni çözümler getirmek yerine, literatürde kullanılan yaklaşımlar kullanılmıştır. Çalışmada, İki tekerlekli denge robotu modeli ters sarkaç problemi temelinde çözümlenmiştir. Lagrange yöntemi kullanılarak hareket denklemleri elde edilmiştir. İki tekerlekli denge robotu 2 serbestlik derecesine sahip olduğu için 2 ayrı hareket denklemi elde edilmiştir. Hareket denklemleri kullanılarak Matlab/Simulink programında; açı geri beslemeli ve açı/hız geri beslemeli 2 ayrı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrol sistemlerinin benzetim modelleri çalıştırılmış ve elde edilen grafikler birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre; açı geri beslemesine sahip kontrol sisteminde, gövdenin dengesi sağlanmıştır. İkinci adımda aynı hareket denklemleri kullanılarak daha karmaşık yapıdaki açı/hız geri beslemesine sahip kontrol sistemi benzetim modeli çalıştırılmıştır. İkinci adımda iki farklı hedef vardır. Bunlar, dengenin sağlanması ve bu esnada iki tekerlekli denge robotunun referans verilen hızda referans verilen yönde kararlı bir şekilde ilerleyebilmesidir. İkinci adımda da kontrol sağlanmıştır. Açı geri beslemesine sahip kontrol sisteminde denge 330 s daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Bu durumun, blok diyagramının daha sade yapıda olmasından dolayı etki tepki sürelerinin daha kısa sürede gerçekleşmesi nedeniyle meydana geldiği öngörülmüştür. Açı/hız geri beslemeli kontrol sistemi daha geç denge sağlanmasına karşın referans verilen yön ve hızda hareketini gerçekleştirmiştir. Dolayısıyla, sistemin uygulamada çalışabileceğini göstermiştir. Kontrol sistemleri içerisindeki blok diyagramlarında gömülü bulunan PID kontrolörlerin, kazanç katsayılarının tüm parametreleri doğrudan etkilediği görülmüştür. Çalışmada bu kazanç katsayıları Matlab/Simulink içerisinde bulunan PID Tuning aracı ile elde edilmiştir. Bu program aracı optimum kazanç katsayılarını en uygun değerlerde üretir. Aynı hareket denklemleri ve aynı kontrol diyagramı kullanılsa bile farklı bir programda yazılarak elde edilecek olan kazanç kat sayıları farklı olacağından, elde edilen veriler de farklı olacaktır. Şekil 8(a)'da Tsai ve Hu'nun tasarladıkları sisteme ait açısal ivme bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, açısal ivme salınımindan ara hesaplamalar yapılarak açısal değişim salınımı elde edilir. Buna göre, bu sistemin  $6.5^\circ$ 'nin üzerinde bir açısal salınım hareketi yaptığı görülmüştür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınıminın  $0.1^\circ$ 'yi aşmadığı görülür. Şekil 8(b)'de Su vd. yaptıkları çalışmalarında geleneksel PD kontrolöre sahip benzetim modelinin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin  $5^\circ$ 'nin üzerinde bir açısal salınım hareketi yaptığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan

benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınıminın  $0.1^\circ$ 'yi aşmadığı görülür.

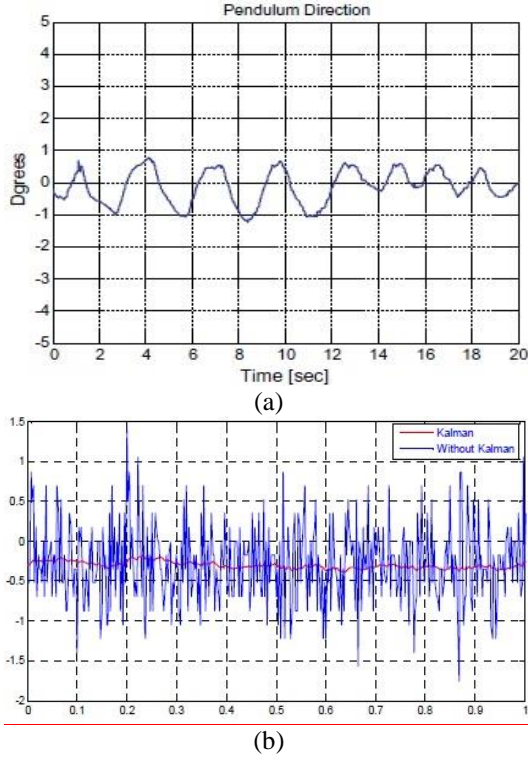


Şekil 8. (a) Tsai ve Hu çalışmalarında elde ettikleri açısal ivme grafiği, (b) Su vd. çalışmalarında PD kontrolörden elde ettikleri açı değişim grafiği

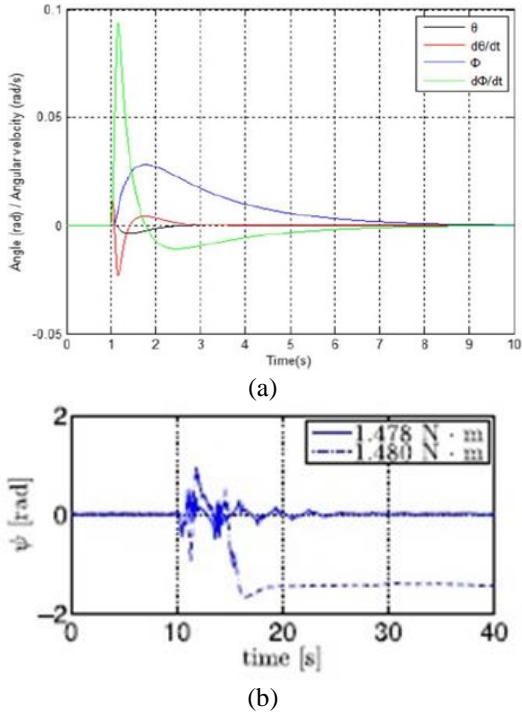
Şekil 9(a)'da Jung ve Lee'nin yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin maksimum açısal sapmasının  $0.5^\circ$  olduğu ve 18. saniyeden sonra  $0.2^\circ$  limitinde bir açısal salınım hareketi yaptığı görülmüştür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınıminın  $0.1^\circ$ 'yi aşmadığı görülür. Şekil 9(b)'de Son ve Anh'nın yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin ortalama  $0.9^\circ$  açısal salınım hareketi yaptığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınıminın  $0.1^\circ$ 'yi aşmadığı görülür.

Şekil 10(a)'da Park ve Cho'nun yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim ve diğer parametrelerinin bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin denge salınına ulaştıktan sonra ortalama  $0.01^\circ$ 'de daha az açısal salınım hareketi yaptığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim modeli grafikleri incelendiğinde açı salınıminın daha fazla olduğu görülür. Şekil 10(b)'de Gandarilla vd. yaptıkları çalışmalarında sistemin açı değişim bilgisini gösteren grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde, sistemin çok düşük limitlerde salınım yaptığı ve rahatsız edici bir etki olmasına rağmen denge salınıma ortalama 10 s'de ulaştığı görülür. Sunulan çalışmada, yapılan benzetim

modeli grafikleri incelendiğinde açı salınımının daha fazla olduğu ve daha uzun sürede denge salınımına ulaştığı görülür.



Şekil 9. (a) Jung ve Lee çalışmalarında elde ettikleri açı değişim grafiği, (b) Son ve Anh çalışmalarında elde ettikleri açı değişim grafiği



Şekil 10. (a) Tsai ve Hu çalışmalarında elde ettikleri açısal ivme grafiği, (b) Su vd. çalışmalarında PD kontrolörden elde ettikleri açı değişim grafiği

Çalışmada, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak üzerinde hassasiyet ile durulması gereken en önemli hususlardan birisinin PID kontrolör olduğu tespit edilmiştir. Çünkü PID kontrolör, yapısındaki kazanç katsayıları sayesinde hataları telafi edebilir. Bu sayede, gövde dengesini sağlamada hiçbir hareket denklemi olmaksızın tasarlanan kontrol sistemleri dahi yalnızca PID kontrolör ile belirli toleranslarda çalışabilir. Yapılan bazı yayınlar da bunun örnekleri vardır. Bu durum, araştırmacının kinematik ve dinamik analizlerde daha dikkatli olmasının önemini vurgular. Çünkü araştırmacının elde ettiği dinamik denklemler hatalı olsa dahi PID kontrolör sayesinde kontrol sistemi belirli toleranslarda çalışacaktır. İki tekerlekli denge robotu ve daha yalın sistemlerde bu hata tolerans sınırları içerisinde kalabilir; fakat bu alt yapı ile oluşturulan daha karmaşık sistemlerde tolerans sınırlarını aşarak sistemin kontrolsüz olmasına neden olabilir. Bu nedenle hareket denklemleri her aşamada kontrol edilmeli ve doğruluğundan emin olunmalıdır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** % 15

#### Kaynaklar

- [1] M. C. Tsai and J. S. Hu, Pilot control of an auto-balancing two wheeled cart. *Advanced Robotics*, 21 (7), 817-827, 2007. <https://doi.org/10.1163/156855307780429785>.
- [2] K. H. Su, Chen, Y. Y. Chen and S. F. Su, Design of neural-fuzzy-based controller for two autonomously driven wheeled robot. *Neurocomputing*, 73, 2478-2488, 2010. <https://doi:10.1016/j.neucom.2010.05.005>.
- [3] L. Vermeiren, A. Dequidt, T. M. Guerra, H. R. Tirmant and M. Parent, Modelling control and experimental verification on a two-wheeled vehicle with free inclination: an urban transportation system. *Control Engineering Practice*, 19, 744-756, 2011. <https://doi:10.1016/j.conengprac.2011.04.002>.
- [4] N. M. A. Ghani, F. Naim and T. P. Yon, Two wheels balancing robot with line following capability. *Engineering and Technology International Journal of Mechatronics Engineering*, 5 (7), 1401-1405, 2011. <https://waset.org/Publication/6566>.
- [5] S. Jung and H. Lee, Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors. *Mechatronics*, 22, 95-105, 2012. <https://doi:10.1016/j.mechatronics.2011.11.011>.
- [6] A. M. Almeshal, K. M. Goher and M. O. Tokhi, Dynamic modelling and stabilization of a new configuration of two-wheeled machines. *Robotics and Autonomous Systems*, 61, 443-472, 2013. <https://doi:10.1016/j.robot.2013.01.006>.
- [7] U. Adeel, K. S. Alimgeer, O. Inam, A. Hameed, M. Qureshi and M. Ashraf, Autonomous dual wheel self balancing robot based on microcontroller. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3 (1), 843-848, 2013. <https://www.textroad.com>.

- [8] N. N. Son and H. P. H. Anh, Adaptive backstepping self-balancing control of a two-wheel electric scooter. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11 (10), 165-176, 2014. [https:// doi:10.5772/59100](https://doi.org/10.5772/59100).
- [9] K. Hirata and T. Murakami, Stability of disturbance observer based controllers for two-wheel wheelchair systems. *Advanced Robotics*, 28 (7), 467-477, 2014. [https:// doi: 10.1080/01691864.2014.888372](https://doi.org/10.1080/01691864.2014.888372).
- [10] U. Çelik, Kendini dengeleyebilen iki tekerlekli aracın tasarımı ve kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [11] S. E. Kara, Control of two wheel self stabilizing mobile robot with a simple arm. A Master's Thesis, Mechatronic Engineering Atılım University, Ankara, Türkiye, 2014.
- [12] F. Dai, X. Gao, S. Jiang, W. Guo and Y. Liu, A two-wheeled inverted pendulum robot with friction compensation. *Mechatronics*, 30, 116-125, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.011>.
- [13] M. Velazquez, D. Cruz, S. Garcia and M. Bandala, Velocity and motion control of a self-balancing vehicle based on a cascade control strategy. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13 (3), 106-117, 2016. [https:// doi: 10.5772/63933](https://doi.org/10.5772/63933).
- [14] S. A. B. Junoh, Two-wheeled balancing robot controller designed using PID. Bachelor Thesis, Faculty of Electrical and Elektronik Engineering University Tun Hussein Onn Malaysia, Johor, Malaysia, 2015.
- [15] S. İlgen, E. Oflaz, E. Gülbahçe and A. Çakan, Modelling and control of a single-wheel inverted pendulum by using adams and matlab. *International Journal of Applied Mathematics*, 4, 326-328, 2016. <http://ijamec.atsscience.org>.
- [16] N. Hirose, R. Tajima, N. Koyama, K. Sukigara and M. Tanaka, Following control approach based on model predictive control for wheeled inverted pendulum robot. *Advanced Robotics*, 30 (6), 374-385, 2016. <https://www.tandfonline.com/loi/tadr20>.
- [17] S. Jeong, K. Kouzai and S. Noguchi, Influence of a rider's rapid weight-shifting motion on the braking of a self-balancing personal mobility vehicle. *Advanced Robotics*, 30 (7), 449-458, 2016. <https://www.tandfonline.com/loi/tadr20>.
- [18] O. İ. Yavuz, A. Çetin ve Ö. Eyecioğlu, İki tekerlekli kendini dengeleyen robot. EEB 2016 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, sayfa 264-269, Tokat, Türkiye, 11-13 Mayıs 2016.
- [19] J. H. Park and B. K. Cho, Development of a self-balancing robot with a control moment gyroscope. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15 (2), 1-11, 2018. [https:// doi:10.1177/1729881418770865](https://doi.org/10.1177/1729881418770865).
- [20] S. Jeong and T. Hayashi, Development of a wheeled inverted pendulum mobile platform with a four-bar parallel mechanism. *Advanced Robotics*, 32 (4), 191-201, 2018. <https://www.tandfonline.com/loi/tadr20>.
- [21] I. Gandarilla, V. Santibanez and J. Sandoval, Control of a self-balancing robot with two degrees of freedom via IDA-PBC. *ISA Transactions*, 88, 102-112, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.12.014>.
- [22] G. Taşhıalan and O. E. Akay, Controlling a two-wheeled balance robot with PD. ISADET2019 International Symposium On Advanced Engineering Technologies, pp. 678, Kahramanmaraş, Türkiye, 02-04 Mayıs 2019.
- [23] İ. Kacar, M. A. Eroğlu and M. K. Yalçın, Design and development of an autonomous bicycle. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 10 (1), 364-372, 2021. <https://doi.org/10.28948/n.gumuh.628580>.







## Kol-kızak mekanizması dinamiğinin deneysel analizi

### Experimental analysis of dynamics of inverted slider-crank mechanism

Çağlar Sevim<sup>1,\*</sup> , İbrahim Uzman<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

<sup>2</sup> Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

#### Öz

Makinalarda temel tahrik mekanizmalarından biri olan kol-kızak mekanizması, dönme hareketini kayar uzuv vasıtasıyla çıkış uzvuna aktararak, çıkış uzvunun sarkaç hareketi yapmasını sağlamaktadır. Bu durum mekanizmada ani yön değişimine ve yüksek hız dalgalanmasına yol açmaktadır. Bu çalışmada kol-kızak mekanizmasının hareket denkleminin çözümünden elde edilen sonuçlar, deneysel sistem cevapları ile karşılaştırılmıştır. Yüksek mertebe doğrusal olmayan değişken katsayılı hareket denklemini çözümünde Runge-Kutta metodu kullanılmış, deneysel sistemde tahrik mili hız değişimini ölçmek için ise bir tam devirde 100 adet sinyal gönderen enkoder kullanılmıştır. Tahrik milinde meydana gelen hız değişimi yaklaşık olarak %20 olarak meydana gelmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kol-Kızak mekanizması, Hareket denklemleri, Dinamik analiz, Deneysel doğrulama

#### 1 Giriş

Mekanizmalar bir işi gerçekleştirmek amacıyla hareketi ya da kuvveti iletmek üzere tasarlanmış uzuv topluluğudur. Mekanizma uzuvlarının kütsel parametrelerinin ve ataletlerinin mekanizmanın dinamiğine katkısını görmek açısından indirgenmiş kütsel atalet momenti değişimi önem göstermektedir. Mekanizmaya uygulanan harici etkiler (iş kuvvetleri, tahrik momenti vb.) de dikkate alındığında, mekanizmalarda güç dengesi kurularak mekanizmaların hareket denklemleri elde edilebilir. Hareket denkleminin çözümü mekanizmanın dinamik davranışını ve uzuvların hareket özelliğini verecektir [1, 2]. Bu konuda çeşitli teorik ve deneysel içerikli çalışmalar mevcuttur. Silva vd. [3] eş merkezli L şekilli çıkış uzvuna sahip bir kol kızak mekanizmasının kinematik analizini gerçekleştirmişlerdir. Uzuvların konum, hız ve ivme gibi kinematik parametrelerinin bulunması amacıyla matris işlemlerine dayalı, her bir uzvun vektör olarak temsil edildiği kinematik model geliştirilmiştir. Çözüm için Runge-Kutta yöntemi kullanılmış ve elde edilen çözüm ADAMS/View programında modellenen çok gövdeli mekanizma ile karşılaştırılmıştır. Shaikh vd. [4] Kol-kızak mekanizmasının dinamik modellenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Mekanizmanın sentezi, geleneksel yöntemin dışında MATLAB aracılığıyla Powell optimizasyon yöntemi ile de yapılmış ve sonuçlar

#### Abstract

The Inverted slider-crank mechanism, which is one of the main driving mechanisms in machines, transfers the rotational movement to the output part with the sliding part, and makes the output member pendulum movement. This situation causes a sudden change of direction and high speed fluctuation in the mechanism. In this study, the results obtained from the solution of the equation of motion of the arm-slide mechanism were compared with the experimental system responses. The Runge-Kutta method is used to solve the high-order nonlinear variable coefficient motion equation, and in the experimental system, an encoder sending 100 signals in one full revolution was used to measure the drive shaft speed change. The speed fluctuation in the crankshaft is approximately 20%.

**Keywords:** Arm-Slider mechanism, Equation of Motion, Dynamic analysis, Experimental validation

karşılaştırılmıştır. Erkaya vd. [5] Biyel ve krank uzuvları arasında eksantrik bir uzva sahip krank-biyel mekanizmasının dinamiği üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Gaz kuvvetleri krank miline hem eksantrik biyel hem de planet dişli sistemi vasıtasıyla iletilmekte olup her iki mekanizmanın dinamik analizi sonucu, klasik krank biyel mekanizmasına göre daha yüksek çıkış momentine sahip olduğu görülmüştür. Karabulut vd. [6] tek silindirli dört zamanlı bir motorun dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada deneysel sistemden alınan silindir içi basınç verilerinin Fourier Serisi açılımı kullanılmış ve gaz kuvvetlerinin etkisi hareket denkleminde bu şekilde katılmıştır. Öztürk vd. [7] Dört zamanlı tek silindirli bir motorun dört serbestlik dereceli dinamik modelini oluşturarak motorun dinamik analizini gerçekleştirmiş ve motor bloğunun düşey ve yatay doğrultudaki titreşimlerini incelemişlerdir. Hesaplamalarında gaz kuvvetlerini de dikkate alarak farklı yüklenme şartları ve sürtünme etkisinin krank mili açısal hızına etkisi incelenmiş ve motor titreşimine yönelik uygun takoz yay ve sönümlenme sabitleri belirlenmiştir. Sarıgeçili vd. [8] Krank biyel mekanizmasının dinamik davranışını topraklanmış kütle yöntemi ile modelleyerek farklı çalışma parametrelerinin piston hızına etkisini incelemiş ve sonuçları deneysel sistemden alınan veriler ile karşılaştırmışlardır. Kabul edilebilir hata farkları ile sonuçlar doğrulanmıştır. Ha vd. [9] dinamik modeli

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: caglar.sevim@ohu.edu.tr (Ç. Sevim)

Geliş / Received: 14.03.2022 Kabul / Accepted: 31.03.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

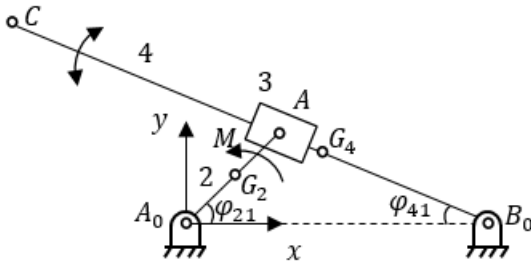
doi: 10.28948/ngumuh.1087806

oluşturulan krank-biyel mekanizmasının hareket denkleminin çözümünden elde edilen tahrik uzvu açısıl konum, hız ve ivmesini deneysel sistem sonuçları ile doğrulamışlardır. Tahrik etkisi için servo motor kullanılan deneysel sistem ile analitik çözüm sonuçları karşılaştırıldığında servo motorun dinamiği doğru olarak modellendiği görülmüştür. Huang vd. [10] uzaysal krank-biyel mekanizmasının dinamik modeli ve deneysel analizi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Aynı zamanda genetik algoritma tabanlı yeni bir doğrulama yöntemi geliştirilmiş ve sonuçlarla karşılaştırıldığında yöntemin kullanılabilir olduğu görülmüştür. Cakar vd. [11] DC motor vasıtasıyla tahrik edilen dört çubuk mekanizmasında, mekanizma ve motorun matematiksel modelini Eksergian Denklemleri ile oluşturmuş ve sonuçları deneysel sistem sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Benzer bir deneysel çalışma Yan vd. [12] tarafından servo motor kontrollü krank biyel mekanizması için yapılmıştır.

Bu çalışmada kol-kızak mekanizmasının dinamik analizi gerçekleştirilmiş ve kol kızak mekanizması deneysel sistemi kurulmuştur. Hareket denkleminin çözümünden elde edilen krank mili açısıl hız değişimleri deneysel sistem ile karşılaştırılmıştır.

## 2 Kol-kızak mekanizması matematiksel modeli ve hareket denklemleri

### 2.1 Kol-kızak mekanizması hareket denklemleri



Şekil 1. Kol-kızak mekanizması şematik görünümü

Literatürde hızlı dönüş mekanizması (quick return mechanism) olarak adlandırılan kol-kızak mekanizması, yapısal olarak dönme hareketini gidip-gelme veya salınım hareketin dönüştürür. C noktasına bağlanacak farklı uzuvlar ile var-gel, testere gibi makinelerin temel hareket mekanizmalarından olan kol-kızak mekanizması şematik görünümü Şekil 1’de verilmiştir.  $A_0$  noktasından tahrik edilen mekanizmada  $A_0A$  kolu, dönme hareketi ile A noktasında mafsallanmıştır ve 4 numaralı uzvu üzerinde kayar hareket yapan 3 numaralı uzvu hareket ettirmektedir. 3 numaralı uzvu hareketi iki farklı uzvu tarafından sınırlandırılmış olduğundan 4 numaralı uzvu üzerinde kayar hareket gerçekleştirerek, uzva sınırlı dönme hareketi yaptırmaktadır. Burada  $AB_0$  mesafesi zamana, dolayısıyla giriş uzvu açısıl konum değerine göre değişmektedir;

$$AB_0 = \sqrt{A_0A^2 + A_0B_0^2 - 2 \cdot A_0A \cdot A_0B_0 \cdot \cos \varphi_{21}} \quad (1)$$

$CB_0$  uzvu açısıl konum değişkeni  $\varphi_{41}$  ise;

$$\varphi_{41} = \sin^{-1} \left( \frac{A_0A \cdot \sin \varphi_{21}}{AB_0} \right) \quad (2)$$

olarak tanımlanabilir. Denklem (1) ve Denklem (2)’deki konum değişkenleri mekanizmanın dinamiğini doğrudan belirleyici olan indirgenmiş kütleli atalet momenti  $I$  üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Mekanizmanın hareket denklemleri için kinetik ve potansiyel enerjiler ile birlikte toplam enerji terimlerinin tanımlanması gereklidir. Lagrange denklemi vasıtasıyla oluşturulan hareket denkleminde enerjinin korunumu esastır. [14]

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \mathcal{L}(\varphi)}{\partial \dot{\varphi}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(\varphi)}{\partial \varphi} = Q(\varphi) \quad (3)$$

Burada,  $\mathcal{L}$  Lagrangian terimi olup kinetik ve potansiyel enerji farkına ( $\mathcal{L} = E_{kin} - E_{pot}$ ) eşittir.  $Q(\varphi)$  ise genelleştirilmiş kuvvet/moment fonksiyonudur.

Mekanizmalarda kinetik enerji dönme ve öteleme kaynaklı enerji toplamı ile tanımlanarak, mekanizmayı oluşturan uzuvların kütle merkezlerinin öteleme ve dönme hareketlerini dikkate alarak türetilir.

$$E_{kin}(\varphi) = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^l [ m_i(\dot{x}_{Gi}^2 + \dot{y}_{Gi}^2) + I_{Gi}\dot{\varphi}_i^2 ] = \frac{1}{2} I(\varphi) \dot{\varphi}^2 \quad (4)$$

Burada  $i$  uzvu sayısı,  $\dot{x}_{Gi}$  ve  $\dot{y}_{Gi}$  her bir uzvu kütle merkezinin öteleme kaynaklı hız bileşenleri olup,  $I_{Gi}$ ,  $i$ ’nci uzvu kütle merkezine göre kütleli atalet momentidir. Eşitliğin sağ tarafında yer alan  $I(\varphi)$  makinenin tahrik miline indirgenmiş kütleli atalet momenti ve  $\dot{\varphi}$  mil hızıdır.

Uzuvların kütle merkezlerinin yer çekimine karşı yaptığı işlerin toplamı olmak üzere toplam potansiyel enerji ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$E_{pot}(\varphi) = \sum [m_i g y_{Gi}] \quad (5)$$

Denklem (3)’deki türev ifadeleri yerine konulduğunda mekanizmanın hareket denklemleri;

$$I(\varphi) \ddot{\varphi} + \frac{1}{2} I'(\varphi) \dot{\varphi}^2 + E'_{pot}(\varphi) = Q(\varphi) \quad (6)$$

Burada; Genelleştirilmiş koordinat  $\varphi$  olup, genelleştirilmiş koordinata göre olan türevler çizgi (') ile, zamana göre olan türevler nokta (·) ile gösterilmiş olup  $I'(\varphi)$  mekanizmanın indirgenmiş kütleli atalet momentinin genelleştirilmiş koordinat  $\varphi_{21}$ ’e göre türevidir.

Mekanizmaya ait indirgenmiş kütleli atalet momenti ise Denklem (7)’de tanımlanmıştır.

$$I(\varphi) = m_2 \cdot (x'_{A_0G_2}{}^2 + y'_{A_0G_2}{}^2) + I_{G_2} + m_3 \cdot (x_A'^2 + y_A'^2) \\ + I_{G_3} \cdot \dot{\varphi}_{31}^2 + m_4 \cdot (x'_{B_0G_4}{}^2 + y'_{B_0G_4}{}^2) \\ + I_{G_4} \cdot \dot{\varphi}_{41}^2 \quad (7)$$

Genelleştirilmiş kuvvet/moment  $Q(\varphi)$  ifadesi tahrik momenti, fren kuvvetleri, dış kuvvet/momentlerden oluşmaktadır.

Deneyel sistemde tahrik kaynağı olarak AGM 90 S 2 tipi 1.5 kW gücünde asenkron motor kullanıldığı için, dinamik analizde de aynı motor parametreleri kullanılmıştır. Asenkron motorlarda moment ifadesi aşağıdaki gibidir [2],

$$M = \frac{M_d}{1 + (s_d - s)^2(a/s - bs^2)} \quad (8)$$

Burada  $s$  kayma değeri olup  $s = 1 - \left(\frac{n}{n_s}\right)$ ' dir.  $M_d$  devrilme momenti,  $n$  çalışma hızı,  $n_s$  nominal hız ve  $s_d$ ,  $a$ ,  $b$  değerleri ise her bir motor tipi için belirlenmiş sabit parametrelerdir. AGM 90 S 2 tip motor parametreleri Tablo 1' de verilmiştir.

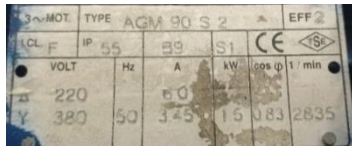
**Tablo 1.** NM 132M-4 tip motor parametreleri [2]

Parametre	Değer
$M_d$	12 75 Nm
$n_s$	2835 1/dk
$s_d$	0 315
$a$	2 565
$b$	1 380

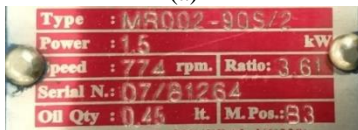
Denklem (6)' da elde edilen hareket denklemi ikinci dereceden değişken katsayılı lineer olmayan bir denklemdir. Denklem çözümü 4.dereceden Runge-Kutta Metodu kullanılmıştır. Bu metotta başlangıç koşulları ile birlikte, çözüm eğrisinin değişimi belirlenen bir zaman aralığı için dört farklı noktada hesaplanır [13]. Kol-Kızak mekanizmasının hareket denklemi çözümünde MATLAB programı üzerinde, 4.dereceden Runge-Kutta metoduna dayanan ode45 çözüm operatörü kullanılmıştır.

## 2.2 Deneyel sistem ve sistem parametreleri

Deneyel sistemde tahrik kaynağı olarak, uygulamada yaygın kullanım alanı olması sebebi ile asenkron elektrik motoru kullanılmıştır.



(a)



(b)

**Şekil 2.** Deneyel sistem (a) motor ve (b) redüktör bilgileri

Motor çıkış milinde, mile akuple edilmiş ve çıkış hızını 3.61 oranında düşüren çift dişli sistemine sahip redüktör bulunmaktadır. Teorik analizde redüktörün, mekanizmanın dinamiğine katkısı sabit atalet momenti olarak kabul edilmiştir. Motor ve redüktör etiket bilgileri Şekil 2'de verilmiştir.

Dinamik analizi yapılacak kol kızak mekanizmasının deneyel sisteminde tahrik uzvunun ağırlık merkezi  $A_0G_2$  olarak ve çıkış uzvunun ağırlık merkezi  $B_0G_4$  olarak tanımlanmıştır. Kol uzvuna bağlı kızak mekanizması olarak lineer ray-araba çifti kullanılmış olup, araba içinde sonsuz bilye sistemi bulunmakta ve bu durum sürtünmenin azalmasına yardımcı olmaktadır. Deneyel sistem görünümü Şekil 3' de verilmiştir. Genel olarak teoride ağırlık merkezinin uzuvların tam orta noktalarında olduğu kabul edilerek kütesel atalet momentleri de bu şekilde tanımlanmaktadır. Uygulamada ise uzuvların ağırlık merkezleri uzuv yapılarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Yapılan hesaplamalarda, deneyel sistemde kullanılan uzuvların bağ noktalarının ve/veya uzuv geometrilerinin farklılığından dolayı oluşan dengesiz kütle dağılımı, uzuvların ağırlık merkezlerini değiştirmektedir. Bu durumun ise dinamiği etkileyeceği aşikârdır. O yüzden deneyel analizi yapılacak mekanizmayı oluşturan uzuvların geometrik özellikleri, kütle merkezlerinin gerçek yerleri ve buna bağlı olarak hesaplanan kütesel atalet momentleri teorik hesaplamalara da birebir aktarılmıştır. Deneyel sistem parametreleri Tablo 2' de verilmiştir.

**Tablo 2.** Deneyel sistem parametreleri

Parametre	Değer
$A_0A$	150 mm
$A_0G_2$	75 17 mm
$A_0B_0$	500 mm
$B_0C$	900 mm
$B_0G_4$	336 2 mm
$I_{G_2}$	0 000756 kgm <sup>2</sup>
$I_{G_3}$	0 0015 kgm <sup>2</sup>
$I_{G_4}$	0 2023 kgm <sup>2</sup>
$I_{sabit}$	0 42 kgm <sup>2</sup>
$m_2$	0 27275 kg
$m_3$	1 6662 kg
$m_4$	2 96932 kg



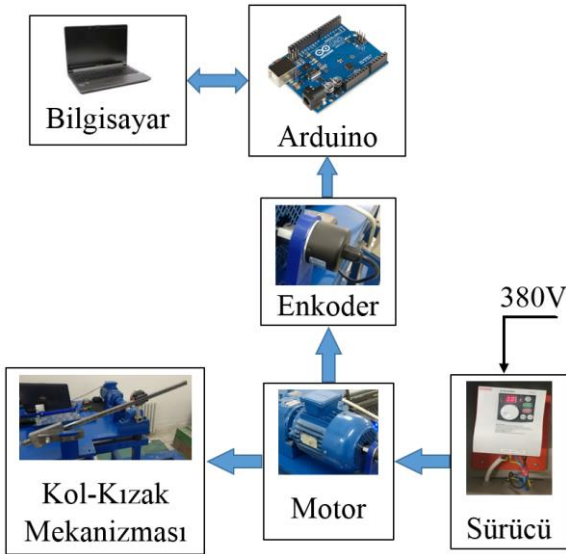
**Şekil 3.** Kol-kızak mekanizması deneyel sistemi

Deneysel sistemde çalışma hızı 276 d/dk seçilmiş olup redüktör çıkış mil hızı 76.45 d/dk' dır. Tahrik milinin anlık konum ve hızı, motor miline akuple edilmiş enkoder vasıtası ile ölçülmüştür. Şekil 4' de enkoder bağlantısı genel görünümü verilmiştir. Olası merkez kaçıklığını ve küçük titreşim etkilerini sönmülemek amacıyla enkoder için bağlantı ayağı tasarımı yapılarak 3B yazıcı ile üretilmiştir.



Şekil 4. Enkoder bağlantısı

Sistemde kullanılan enkoder 1 tam turda 100 adet sinyal göndermektedir. Sinyal bilgileri, açık kod kaynaklı Arduino kontrol sistemi ile işlenerek konum ve hız bilgisine çevrilmektedir. Deneysel kontrol ve ölçüm sistemi blok diyagramı Şekil 5' de verilmiştir.

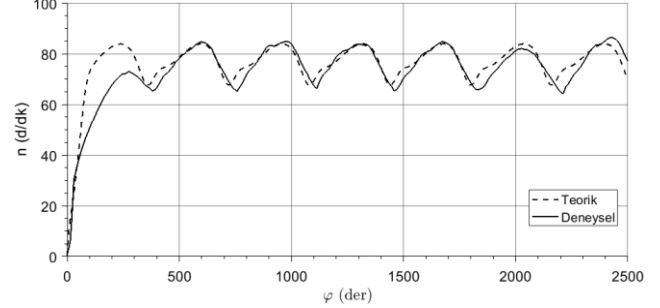


Şekil 5. Deneysel sistem blok diyagramı

### 3 Bulgular ve tartışma

Bu çalışmada kol-kızak mekanizmasının deneysel sistem kurulumu gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar hareket denklemi çözümü ile karşılaştırılmıştır. Mekanizmanın hareket denkleminde sürtünme ve diğer kayıplar ihmal edilmiş olup mekanizma üzerine potansiyel kuvvetler ve tahrik motor momenti hariç herhangi bir dış kuvvet/moment etkimemektedir. Hareket denklemi çözümü 4.dereceden Runge-Kutta metodu ile yapılmıştır. Deneysel sistemde tahrik mili konumu ve hızı enkoder üzerinden ölçülmüş, olası salınımların önüne geçmek adına mekanizma tahrik mili çift rulmanlı yataklar ile desteklenmiş ve tüm uzuvlar hassas olarak yataklanmıştır. Hareket denklemi çözümü, mekanizmanın durağan halden ve  $\varphi_{21} = 0^0$  'lik

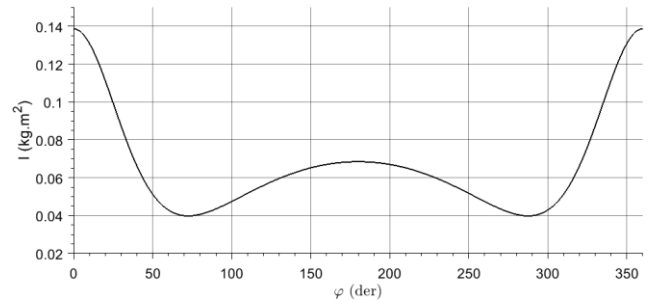
konumundan itibaren yapılmış olup deneysel sistem de aynı başlangıç şartları ile başlatılmış ve tahrik mili hız değişimi ölçülmüştür. Hareket denklemi çözümünden ve deneysel sistemden elde edilen, tahrik milinde oluşan hız değişimi Şekil 6' da verilmiştir.



Şekil 6. Tahrik mili hız değişimi

Deneysel sistemde tahrik mili hız değişimi, teorik analizden elde edilen hız değişimi ile aynı değişim karakterine sahiptir. Elde edilen sonuçlar mekanizmanın dinamik analizinde, hareket denkleminin ve kullanılan çözüm yönteminin kabul edilebilirliğini göstermektedir. Bununla birlikte, deneysel sistemde var olan sürtünmeler ve diğer kayıplardan dolayı tahrik mili hız değişimi tam periyodik hal göstermemektedir. Bu duruma, hareket denkleminde etkisi ihmal edilen; motor rulman aşınmaları, redüktör içerisinde bulunan çift aktarımli dişli sistemindeki kayıplar, bağ noktalarındaki sürtünmeler ve montaj hatası etkileri sebep olduğu düşünülmektedir.

Mekanizmanın dinamiğini belirleyici etken sadece kendi uzuvlarının kütleli atalet momenti etkisidir. Bu yüzden teorik analizde mekanizma  $\varphi_{21} = 0$  konumundan düzgün bir hızlanma sonrasında periyodik hareket yapmaktadır. Mekanizmanın tahrik miline indirgenmiş kütleli atalet momenti değişimi Şekil 7' de verilmiştir. Mekanizma üzerinde, mekanizmanın kendi ataleti harici bir dış yük bulunmadığından dolayı, mekanizma dinamiğini indirgenmiş kütleli atalet momenti belirlemektedir.

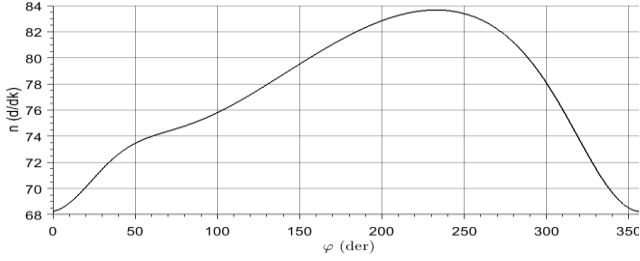


Şekil 7. İndirgenmiş kütleli atalet momenti

Mekanizmaya ait indirgenmiş kütleli atalet momenti, başlangıç konumunda en yüksek değerini alırken, çıkış uzvu hareketinde C noktasının üst ve alt sınır konumları olan, krank milinin  $72.5^0$  ve  $287.5^0$  'lik açısal konumlarında minimum değerini almaktadır. Mekanizma durağan hal ve başlangıç konumundan itibaren tahrik edilmeye başladığında kararlı çalışma haline ikinci turunda geçtiği



görülmektedir. Kararlı çalışma hal aralığında bir tam turdaki hız değişimi Şekil 8’ de verilmiştir.

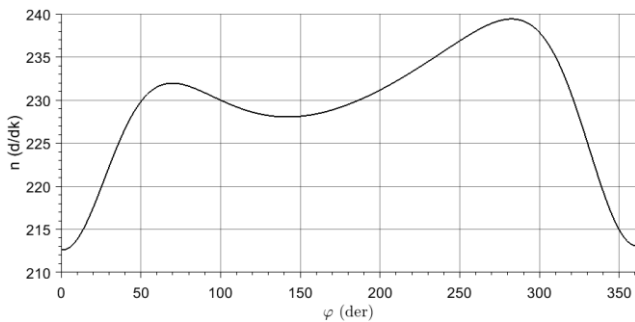


Şekil 8. Kararlı çalışma hal aralığında bir tam turdaki hız değişimi

Şekil 7 ve 8’ de bir tam tur için verilen indirgenmiş kütlelesel atalet momenti ve hız değişim karakterlerinin, Denklem (6) ifadesine uygun şekilde ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Başlangıç anında indirgenmiş kütlelesel atalet en yüksek değerinde iken hız en düşük değeri almaktadır. İndirgenmiş kütlelesel ataletin en düşük olduğu sınır konumlarının her ikisinde hızın maksimum olması beklenirken, 72.5°’lik üst sınır konumunda hız, 287.5°’lik alt sınır konumuna göre daha düşük değerdedir. Bu durumda hız düzgünlüğü Denklem (8)’ de ifade edildiği üzere yaklaşık %20 olarak meydana gelmektedir.

$$\delta = \frac{n_{max} - n_{min}}{n_{nominal}} = \frac{83,67 - 68,23}{76,45} \cong 0.201 \quad (8)$$

Denklem (5)’ de ifade edilen potansiyel enerjiler, mekanizma hızından bağımsız olup konuma bağlı olarak değişmektedir. Denklem (4)’ de ifade edilen mekanizmaya ait toplam kinetik enerji her bir uzvun hızlarının kareleri ile orantılı olarak artmaktadır. Çalışmada seçilen motor hızı 276 d/dk olup redüktör çıkışı tahrik mili hızı 76,5 d/dk olmaktadır. Bu sebeple düşük hızlarda uzuvların yüklendiği enerji üzerinde potansiyel kuvvetlerin etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Hız arttıkça kinetik enerjide artış meydana geleceği için potansiyel enerji etkisi azalacak, kinetik enerji değişimi, hız değişim karakterinde belirleyici olacaktır. Potansiyel kuvvetlerin mekanizma üzerinde etkisinin görülmesi için hareket denklemi çözümünde çalışma hızı üç katına (828 d/dk (229.36 d/dk redüktör çıkış hızı)) çıkarıldığında tahrik milinde meydana gelen hız değişimi Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 9. Ortalama 828 d/dk çalışma hızında meydana gelen tahrik mili hız değişimi

Hızın artması ile birlikte, uzuvların yüklendiği enerji miktarı artmakta ve tahrik mili hız değişimi potansiyel kuvvetlerin de tesiri altında, indirgenmiş kütlelesel atalet değişim karakterine yaklaştığı görülmüştür. Bu durumda hız düzgünlüğü %11.6 olmaktadır.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada deneysel sistem kurulumu gerçekleştirilen kol-kızak mekanizmasının hareket denklemi oluşturulmuş ve Runge-Kutta yöntemi ile çözümü yapılmıştır. Deneysel sistemde krank miline akuple edilmiş enkoder vasıtasıyla elde edilen krank mili hız değişimi, hareket denklemi çözümü ile karşılaştırılmış ve sonuçlar önerilen hareket denklemi çözümünün kabul edilebilirliğini kanıtlamıştır. 276 d/dk’lık çalışma hızında hız düzgünlüğü %20 olurken, 828 d/dk’lık çalışma hızında bu değer %11.6 olarak hesaplanmıştır. Çalışma hızı arttıkça mekanizmanın toplam kinetik enerjisi her bir uzvun hızlarının kareleriyle orantılı olarak arttığından dolayı krank mili hız değişim karakteri, mekanizmanın A<sub>0</sub> noktasına indirgenmiş kütlelesel atalet momenti değişim karakterine (ters orantılı şekilde) yaklaştığı görülmektedir. Çalışma hızındaki artış, hız düzgünlüğünde azalmaya neden olmakta fakat incelenen mekanizmanın yapısı itibarıyla hızlı dönüş mekanizması olması sebebiyle sözü edilen artış uzuvlar arasında ve mekanizma yataklarında ani ve yüksek kuvvet oluşumlarına neden olabilecektir. Bu nedenle de sistemin çalışma hızının bu doğrultuda belirlenmesi gerekmektedir. Hız düzgünlüğünün yüksek değerlerinde tahrik miline volan dahil edilmesi veya mekanizmanın dönme hareketi yapan uzuvlarına dengeleyici karşı ağırlık eklenmesi, hız düzgünlüğünde azalma meydana getirecektir. İleriki çalışmalarda yüksek hızlarda çalışan kol-kızak mekanizmasında yatak kuvvetlerini ve oluşan hız düzgünlüğünü azaltmaya yönelik, mekanizmanın kuvvet analizleri ve uygun volan tasarımı yapılması planlanmaktadır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (Turnitin): %2

#### Kaynaklar

- [1] F. Pasin, Makina dinamiği, Birsen Yayınevi, 1997.
- [2] E. Söylemez, Makina Teorisi-2: Makina Dinamiği, Birsen Yayınevi, 2007.
- [3] R.C. Silva, M.A. Nunes, J.P.M. Bento and V.E. Costa, Modelling an inverted slider crank mechanism considering kinematic analysis and multibody aspects. DINAME, Proceedings of the XV international symposium on dynamic problems of mechanics, Feb. 17-22, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11044-016-9515-x>
- [4] Z.A. Shaikh, T.Y. Badgujar, Optimal Kinematic Synthesis of Crank and Slotted Lever Mechanism. Int. J. Mod. Trends Eng. Res. 4, 67-74, 2017. <https://doi.org/10.21884/ijmter.2017.4383.yhf3q>
- [5] S. Erkaya, Ş. Su, I. Uzmay, Dynamic analysis of a slider-crank mechanism with eccentric connector and

- planetary gears. *Mech. Mach. Theory* 42, 393–408, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2006.04.011>
- [6] H. Karabulut, E. Öztürk ve C. Çınar, Tek silindirli dört zamanlı bir dizel motorunun dinamik modeli ve titreşimlerinin incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 26, sayı. 1, ss. 0, 2011
- [7] E. Öztürk ve H. Karabulut, Tek silindirli bir dizel motorunun dinamik ve titreşim analizleri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 27, sayı. 3, ss. 0, 2012
- [8] M. İ. Sarıgeçili ve İ. D. Akçalı, Dynamic modeling of slider-crank mechanism for selecting input parameters for desired piston speeds: Lumped mass approach, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 33, sayı. 4, ss. 67-82, Ara. 2018. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.522981>
- [9] J. L. Ha, R. F. Fung, K. Y. Chen, S. C. Hsien, Dynamic modeling and identification of a slider-crank mechanism. *J. Sound Vib.* 289, 1019–1044, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.03.011>
- [10] M. S. Huang, K. Y. Chen, R. F. Fung, Comparison between mathematical modeling and experimental identification of a spatial slider-crank mechanism. *Appl. Math. Model.* 34, 2059–2073, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.10.018>
- [11] O. Çakar, A. K. Tanyıldızı, Application of moving sliding mode control for a DC motor driven four-bar mechanism. *Adv. Mech. Eng.* 10, 1–13, 2018. <https://doi.org/10.1177/1687814018762184>
- [12] H. S. Yan, W. R. Chen, On the output motion characteristics of variable input speed servo-controlled slider-crank mechanisms. *Mech. Mach. Theory* 35, 541–561, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(99\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(99)00023-3)
- [13] S. C. Chapra, R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, McGraw-Hill, 2010.
- [14] H. Dresig, H. Franz. *Dynamics of machinery: theory and applications*, Springer Science & Business Media, 2010.





## AISI 304 paslanmaz sac malzemenin lazerle işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak yüksekliğine etkisinin araştırılması

### Investigation the effect of cutting parameters on surface roughness, kerf width and dross height in laser processing of AISI 304 stainless sheet material

İbrahim Cebeci<sup>1</sup> , Barış Özlü<sup>2,\*</sup> , Halil Demir<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Tan Kauçuk San. ve Tic. Limited Şirketi, Organize Sanayi, 54500, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup> Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

<sup>3</sup> Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

#### Öz

Yapılan çalışmada, AISI 304 paslanmaz sac malzemenin lazer kesim işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak yüksekliği üzerine etkileri araştırılmıştır. Lazer kesme işleminde iki farklı gaz basıncı (0.8 bar ve 1 bar), dört farklı kesme hızı (20 mm/sn, 24 mm/sn, 28 mm/sn ve 32 mm/sn) ve dört farklı frekans (3500 Hz, 4000 Hz, 4500 Hz ve 5000 Hz) değerleri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, değişken kesme parametreleriyle kesilmiş sac malzeme üzerinde yapılmıştır. Dijital mikroskop kullanılarak numunelerin kerf genişlikleri ve çapak yükseklikleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmuştur. Frekans değerinin artırılması yüzey pürüzlülük ve çapak yüksekliğinin azalmasına ve kerf genişliğinin artmasına neden olmuştur. Frekans değerinin değiştirilmesinin çapak yüksekliği üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Lazer kesim, AISI 304 paslanmaz sac malzeme, Yüzey pürüzlülüğü, Kerf genişliği, Çapak yüksekliği

#### 1 Giriş

AISI 304 paslanmaz sac malzeme, hijyenik özelliği, korozyon dayanımı, yüksek ve düşük sıcaklıklarda dayanım, imalat kolaylığı ve mekanik dayanım özellikleri nedeniyle günlük hayatta hemen hemen her alanda kullanılmasıyla günlük hayatın bir parçası haline gelmiştir. Ek olarak, farklı ısı işlem prosesleriyle sertleştirme olmadan uygun işlenebilirliğe sahiptir [1-2].

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte gelişen işleme prosesleri arasında lazer kesim, çok farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılan en yaygın termal bazlı işleme yöntemlerinden biri olduğu bilinmektedir. Lazer kesme işlemi, lazer ışını iş parçası malzemesinin yüzeyine odaklanarak ısıtma veya buharlaştırma ile yapılmaktadır. Karmaşık şekiller üzerinde hızlı çalışma, işleme yapılan parça üzerinde mekanik stres oluşturmaması, malzeme sarfiyatını azaltması, ekolojik olarak temiz teknolojisi olması

#### Abstract

In the study, laser cutting of AISI 304 stainless sheet material were investigated the effects of cutting parameters on surface roughness, kerf width and dross height. In laser cutting were used two different gas pressures (0.8 bar ve 1 bar), four different cutting speeds (20 mm/sec, 24 mm/sec, 28 mm/sec ve 32 mm/sec) and four different frequency (3500 Hz, 4000 Hz, 4500 Hz ve 5000 Hz). Surface roughness measurements were made on the sheet material cut with variable cutting parameters. Kerf widths and dross heights of the samples were measured using a digital microscope. As a result, the increase in cutting speed has caused surface roughness, kerf width and dross height to decrease. Increasing the frequency value has caused the surface roughness and dross height to decrease and kerf width to increase. It has been observed that changing the frequency value does not have a significant effect on the burr height.

**Keywords:** Laser cutting, AISI 304 stainless sheet material, Surface roughness, Kerf width, Dross height

ve hassas ölçülerde çalışma yeteneğine sahip yüksek enerji yoğunluklu bir işleme yöntemidir [3]. Lazer kesimde, proses performansı üzerinde önemli rol oynayan sayısız parametreye sahip karmaşık bir işleme sürecidir. Özellikle verimlilik, parça kalitesi ve maliyetin en aza indirilmesi lazer kesim teknolojisini kullanan imalatçıların hedef noktasıdır. Bu hedeflere ulaşılabilmesi için genellikle kesme parametreleri ayarlarının doğru ve en optimal değerlerin seçilmesi ile ulaşılabilir. Bununla birlikte bir kalite özelliği için optimum kesme parametre ayarları diğer kalite özelliklerini olumsuz olarak etkilemektedir [4].

Literatür incelemesi sonucu, lazer kesme işleminde parça kalitesini iyileştirmek amacıyla lazer kesme parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. AISI 304 sac malzemesinin lazer kesim tezgâhlarında kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin yüzey

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: barisozlu@aksaray.edu.tr (B. Özlü)

Geliş / Received: 06.07.2020 Kabul / Accepted: 21.03.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.764983

pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. Deneylerde ilerleme hızı, güç, basınç ve yardımcı gaz gibi parametreler değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak lazer kesme işleminde, yardımcı gaz olarak azot gazının kullanıldığı, 1700 W kesme gücü, 1600 mm/sn ilerleme hızında ve 9 bar gaz basıncında optimum yüzey pürüzlülüğünü elde edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği görülmüştür [5]. 1.27 mm kalınlığındaki AISI 4130 sac malzemesinin lazer ile kesilmesinde dört farklı ilerleme hızı ve dört farklı lazer gücü seçilerek yapılan deneylerde, kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü, ısı tesiri altında kalan bölgenin büyüklüğü ve şeritleme frekansı üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda kerf genişliği üzerine en etkin parametrenin lazer gücünün olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ve şeritleme frekansı üzerine önemli bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir [6]. 6 mm kalınlığındaki Hardox 400 malzemesinin lazer kesme işleminde üç farklı lazer gücü, gaz basıncı, frekans ve kesme hızı kesme parametresi olarak belirlemişlerdir. Kesme parametrelerinin kerf genişliği üzerine etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, 1000 W düşük lazer gücünde, 0.6 bar gaz basıncı, 200 mm/sn kesme hızında ve 25 Hz frekans değerinde 0.19 mm en düşük kerf genişliği ölçülmüştür. Ayrıca, en yüksek 2000 W lazer gücünde, 0.7 bar gaz basıncı, 600 mm/sn kesme hızında ve 20 Hz frekans değerinde 2.56 mm en yüksek kerf genişliği ölçülmüştür [7]. 3 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çeliği farklı lazer kesme parametreleri ile keserek kesme parametrelerinin kerf genişliği ve kerf açısına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada kerf genişliği ve kerf açısı için optimum işleme parametrelerinin bulunması için Taguchi metodu kullanılmıştır. Sonuç olarak, 1.8 kW lazer gücü, 3 mm/sn kesme hızı, 9 bar gaz basıncı ve -0.5 mm odak noktasında 0.312 mm en düşük kerf genişliğini ölçmüşlerdir. 1.6 kW lazer gücü, 2.5 mm/sn kesme hızı, 9 bar gaz basıncı ve -1.5 mm odak noktasında 0.83° kerf koniği ile optimum değerleri tespit etmişlerdir [8]. Araştırmacıların yaptıkları bu çalışmada gelişen lazer işleme teknolojisinde istenilen yüksek ölçü tamlığı, iyi yüzey pürüzlülüğü, daha düzgün ve dar kesim izi aralığı ile daha düşük enerji sarfiyatı gibi çıktılar elde edilebilmesi için işleme parametrelerinin optimum değerlerinin ayarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada işleme parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkileri literatürü tarayarak etkilerini ortaya koymuşlardır [9]. Ti6Al4V alaşımının lazer gücü, kesme hızı ve gaz basıncı gibi farklı işleme parametreleriyle kesilmiştir. İşleme parametrelerinin yeniden katılma bölgesi, kerf açısı ve kerf genişliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Lazer gücünün arması ile yeniden katılma bölgesinin kalınlığı artarken kesme hızının artması ile yeniden katılma bölgesinin kalınlığının azaldığı görülmüştür. Lazer gücü ve kesme hızı kerf genişliğinin artmasında önemli rol oynarken gaz basıncının daha az olduğu görülmüştür. Kesme hızının düşük olması, gaz basıncının ve lazer gücünün yüksek olması kerf açısını azalttığını tespit etmişlerdir [10].

Yapılan çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliğin lazerle işlenmesinde kesme hızının, frekans ve gaz basıncı gibi

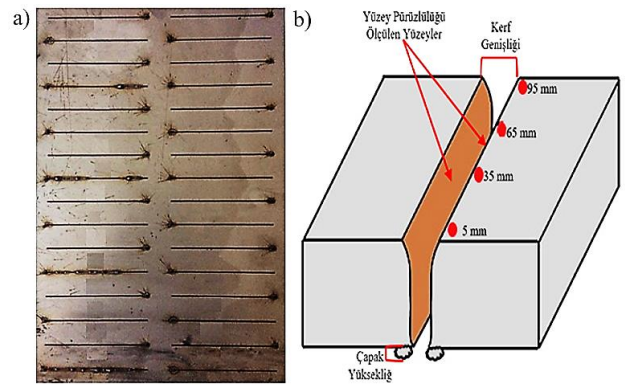
kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve çapak yüksekliği üzerine etkilerinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2 Materyal ve metot

Yapılan çalışmada, AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemesi endüstride en yaygın kullanılan malzemelerden biri olduğu bilinmektedir. Deneylerde kullanılan AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemesinin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Mevcut çalışmada kullanılan AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemesinin kimyasal kompozisyonu

Malzeme	Element						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
AISI 304	0.05	1.537	0.034	0.003	0.572	18.07	8.05



**Şekil 1.** (a) Lazerde işlenmiş numune, (b) numuneler üzerinden ölçüm yapılan noktalar ve konumlar



**Şekil 2.** Deneylerde kullanılan SUNTOP ST-FC3015 marka üç eksenli CNC lazer kesim tezgâhı

Lazer ile kesme işlemi yapılan numune ve numune üzerinden ölçümlerin yapılacağı noktalar ile konumları Şekil 1(a) ve (b)'de gösterilmiştir. Lazer kesme işlemlerinin yapılmasında SUNTOP ST-FC3015 marka üç eksenli CNC lazer kesim tezgâhı kullanılmış (Şekil 2) ve kullanılan lazer kesim tezgâhının özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

AISI 304 kalite paslanmaz sac malzemenin lazerle kesme deneylerinde dört farklı kesme hızı, dört farklı frekans ve iki farklı gaz basıncında gerçekleştirilmiştir. Lazer kesme deneylerinde O<sub>2</sub> (Oksijen) gazı, %100 güç yoğunluğu, 5"



lens ve lazer ışınının çıkış noktasında kullanılan ucun çapı (nozzle) 2 mm olarak belirlenmiştir. Lazer kesme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri **Tablo 3**'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Deneylerde kullanılan SUNTOP ST-FC3015 marka üç eksenli CNC lazer kesim tezgâhının özellikleri

Özellikler	Parametreleri
Maksimum lazer gücü	800 W
Lazer dalga boyu	1064 nm
Etkili işleme alanı	1500x3000 mm
X/Y eksenli konumlandırma hassasiyeti	± 0.03 mm
X/Y eksenli konumlandırma hassasiyeti	0.05/m
Z eksenli rotası	120 mm
Maksimum kesme kalınlığı	≤10 mm
Tüketilen toplam güç	≤8 KW
Yardımcı gaz	O <sub>2</sub>
Maksimum malzeme kesme kalınlığı (Paslanmaz çelik)	6 mm

**Tablo 3.** Deneylerde kullanılan kesme parametreleri

Kesme Parametreleri	Seviyeler			
	1	2	3	4
Kesme Hızı (mm/sn)	20	24	28	32
Frekans (Hz)	3500	4000	4500	5000
Basınç (Bar)	0.8	1	-	-

Lazer kesme işlemi sonucu numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümlerinde **Şekil 3**'te görülen Mitutoyo Surface SJ-210 model test cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün ölçümlerine başlamadan önce yüzey pürüzlülük cihazı, yüzey pürüzlülük değerleri bilinen kalibrasyon bloğu ile kalibrasyonu yapılmıştır.



**Şekil 3.** Mitutoyo Surface SJ-210 yüzey pürüzlülük test cihazı

Örnekleme uzunluğu 0.8 mm olarak seçilmiş ve yüzey pürüzlülüğü ölçülecek yüzey uzunluğu örnekleme uzunluğunun beş katı (4 mm) olarak belirlenmiştir. Ölçümler lazer kesme yönüne dik konumda 4 farklı noktadan yapılan yüzey pürüzlülük değerinin aritmetik ortalaması hesaplanarak belirlenmiştir.

Numunelerin kerf genişlikleri ve çapak yüksekliği numune kesme işlemine başlandığı noktadan başlayarak 5 mm ve daha sonra 30 mm aralıklarla dört farklı noktadan (**Şekil 1(b)**) alınan ölçüler ile belirlenmiştir. Kerf genişliğinin ve çapak yüksekliğinin ölçümünde **Şekil 4**'te

verilen 1600x1200 çözünürlüğe sahip Insize marka ISM-PM200SA dijital mikroskop kullanılmıştır.



**Şekil 4.** ISM-PM200SA dijital mikroskop

### 3 Bulgular ve tartışma

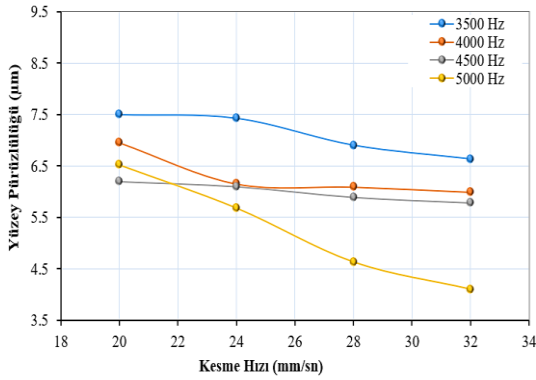
#### 3.1 Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

İmalat sektöründe yaygın olarak kullanılan AISI 304 paslanmaz sac malzemesini lazer ile kesilmesinde en iyi işleme parametrelerini bulmak ve pürüzsüz bir yüzey elde etmek için, iki farklı gaz basıncında, dört farklı kesme hızında ve dört farklı frekans değerlerinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılmıştır (**Şekil 4**).

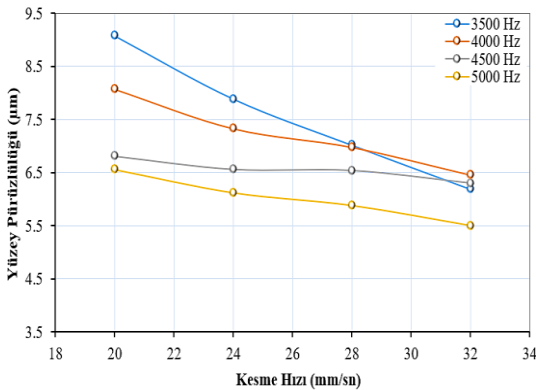
**Şekil 5**'de AISI 304 paslanmaz sac malzemesini 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı (20, 24, 28 ve 32 mm/sn) ve dört farklı frekansta (3500, 4000, 4500 ve 5000 Hz) kesme işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/sn kesme hızında ve 3500 Hz frekansta en yüksek yüzey pürüzlülük değerleri 7.5 µm ölçülmüştür. 20 mm/sn kesme hızında frekans değerlerinin yaklaşık %14.3 (4000 Hz), %28.6 (4500 Hz) ve %42.85 (5000 Hz) artırılması ile yüzey pürüzlülük değerleri sırası ile ortalama %7.3 (6.95 µm), %17.3 (6.2 µm) ve %13.1 (6.52 µm) oranlarında azaldığı görülmüştür. Kesme hızının 20 mm/sn'den 32 mm/sn'ye kadar artırılması ile yapılan deneylerde bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Kesme hızını artırarak yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük değerlerindeki azalmanın nedeni, lazer kesme işleminin yüksek sıcaklıkta malzemeyi ergeterek gerçekleştiği için kesme hızının düşük olması, kesme anında lazer ışınlarının kesilen malzemeyle etkileşiminin daha uzun süreli olması demektir. Kesme işleminde etkileşim süresinin uzun olması, kesilen malzemeye ısının daha fazla nüfuz etmesi ve kesilen yüzeyi daha fazla olumsuz etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 0.8 bar basınçta, kesme hızının 32 mm/sn ve frekansın 3500 Hz yapılan kesme işleminde yüzey pürüzlülük değeri 6.63 µm olmuştur. 32 mm/sn kesme hızında frekans değerinin 5000 Hz çıkarılması ile yapılan deneylerde 0.8 bar basınçta 4.1 µm ile en düşük yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır.

AISI 304 paslanmaz sac malzemesini 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı (20, 24, 28 ve 32 mm/sn) ve dört farklı frekansta (3500, 4000, 4500 ve 5000 Hz) kesme işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri **Şekil 6**'de

görülmektedir. 20 mm/sn kesme hızında ve 3500 Hz frekansta yüzey pürüzlülük değeri 9.08  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. 20 mm/sn kesme hızında frekansın 5000 Hz çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değeri % 27.75 oranında azalarak 6.56  $\mu\text{m}$  olmuştur. Kesme hızının 20 mm/sn'den 32 mm/sn'ye kadar artması ile yapılan deneylerde bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma olduğu görülmüştür. 3500 Hz frekans değerlerinde kesme hızının 32 mm/sn'ye çıkarılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ortalama %31.8 oranında azalarak 6.19  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. Frekans değerinin %42.85 oranında artırılarak 5000 Hz çıkarılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü azalarak 5.5  $\mu\text{m}$  olmuştur. Yapılan çalışmada basıncın artması ile bütün kesme hızlarında ve frekans değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Ayrıca lazerle kesme işleminde kesme hızının ve frekans değerlerinin artırılması yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olmuştur. Özellikle kesme hızının artması ile kesme bölgesindeki ergitilen malzemenin az olduğu için daha kısa zamanda katılaşması daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü sağlamaktadır. Bu sonuçlarla literatürde yapılan çalışmaların sonuçları tutarlılık göstermektedir [11].



Şekil 5. 0.8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri



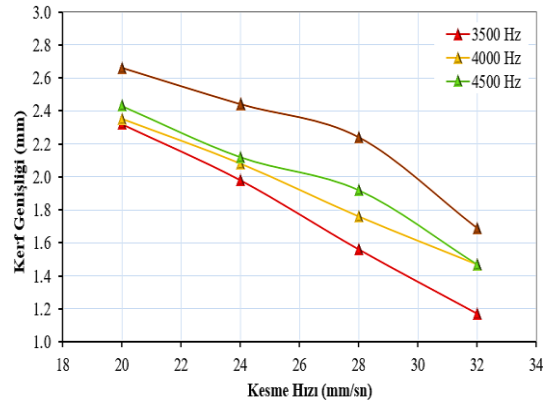
Şekil 6. 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri

### 3.2 Kerf genişliğinin değerlendirilmesi

AISI 304 paslanmaz sac malzemesini lazer ile kesilmesinde kerf genişliğinin ölçümleri, kesme işleminin başlangıç noktasından kesme işleminin son bulduğu noktaya kadar farklı noktalardan alınan ölçümlerin ortalama değerleri

ile belirlenmiştir. Deneyler iki farklı basınçta, dört farklı kesme hızında ve dört farklı frekans değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucu iki farklı basınçta kesme hızının ve frekansın kerf genişliğine etkisi Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.

AISI 304 paslanmaz sac malzemesini 0.8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı (20, 24, 28 ve 32 mm/sn) ve dört farklı frekansta (3500, 4000, 4500 ve 5000 Hz) kesme işlemi sonucunda elde edilen kerf genişliğindeki değişim Şekil 7'da verilmiştir. Şekil 7'da 0.8 bar basınçta 20 mm/sn kesme hızında 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 2.33 mm olmuştur. Frekans değerlerinin 4000, 4500 ve 5000 Hz çıkarılması ile kerf genişlikleri artarak sırası ile 2,35 mm, 2,43 mm ve 2,66 mm değerleri ölçülmüştür. Kesme hızının 32 mm/sn kadar artması ile bütün frekans değerlerinde kerf genişliğinin düzenli bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. 32 mm/sn kesme hızında 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği %49.57 azalarak 1.17 mm ile en düşük kerf değeri ölçülmüştür. 32 mm/sn kesme hızında frekans değerlerinin ortalama %14.3 (4000 Hz), %28.6 (4500 Hz) ve %42.85 (5000 Hz) artırılması ile yapılan deneylerde kerf genişliği değerleri artarak sırası ile 1.47 mm, 1.49 mm ve 1.69 mm olmuştur.

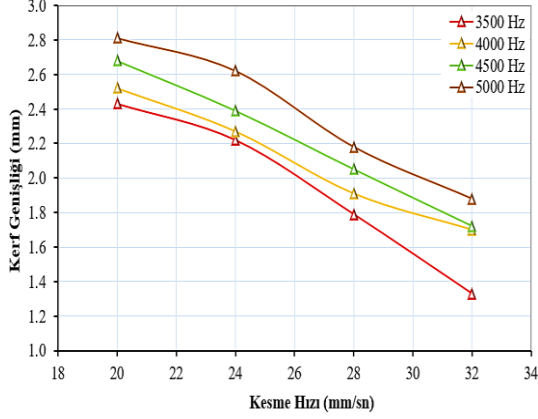


Şekil 7. 0.8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri

Bir bar basınçta, dört farklı kesme hızı (20, 24, 28 ve 32 mm/sn) ve dört farklı frekansta (3500, 4000, 4500 ve 5000 Hz) AISI 304 paslanmaz sac malzemesini kesme işlemi sonucunda elde edilen kerf genişliği değişimi Şekil 8'de sunulmuştur.

Şekil 8'de görüldüğü gibi, bir bar basınçta 20 mm/sn kesme hızında 3500 Hz frekans değerlerinde yapılan kesme işleminde kerf genişliği 2.43 mm ölçülmüştür. 20 mm/sn kesme hızında frekans değerlerinin 4000 Hz, 4500 Hz ve 5000 Hz çıkarılması ile yapılan kesme işlemlerinde kerf genişliklerinde sırası ile %37.7 %10.29 ve %15.64 oranlarında artma görülmüştür. Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinin azaldığı görülmüştür. Bir bar basınçta, 32 mm/sn kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde yapılan kesme işlemlerinde kerf genişliği 1.33 mm ölçülmüştür. 32 mm/sn kesme hızında frekans değerinin 5000 Hz çıkarılması ile yapılan kesme işlemlerinde kerf genişliği 1.88 mm olmuştur. Yapılan deneylerde frekans değerlerinin artırılması daha büyük kerf

genişliğinin oluşmasına ve diğer taraftan kesme hızındaki artışın kerf genişliğinin azalmasına yol açtığı görülmüştür. Kesme hızının artırılması lazer ışını ile iş parçası arasında daha az etkileşim süresine neden olacağından kesilmiş çentik için sağlanan enerjiyi azalacaktır. Buda kesme bölgesinde daha az malzemenin erimesine ve düşük kerf genişliklerinin oluşmasına neden olacaktır [12].



Şekil 8. 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri

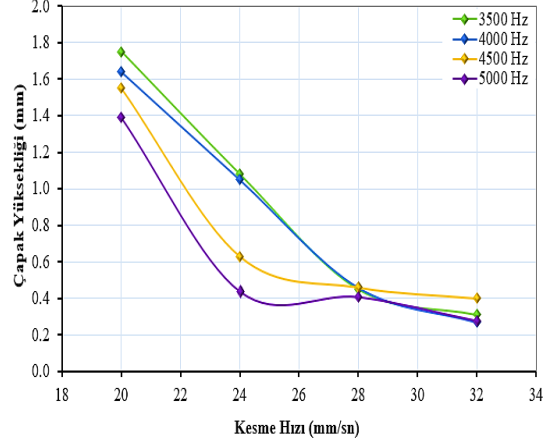
### 3.3 Çapak yüksekliğinin değerlendirilmesi

Çapak oluşumu ve oluşan çapağın yüksekliği genel olarak talaşlı imalat açısından değerlendirildiğinde ürün kalitesi etkileyen en önemli çıktılardan biri olduğu bilinmektedir. Lazer kesme işleminde de çapak oluşumu ve çapak yüksekliği ürün kalitesi bakımından dikkat edilmesi gereken bir diğer husustur. Çapak oluşumu iş parçasının lazer ile kesilmesinde işleme parametrelerinden ve iş parçasının geometrik özelliklerinden etkilenmektedir. Özellikle imalat açısından çapak oluşumunu etkileyen işleme parametrelerini en iyi şekilde anlayabilmek oldukça karmaşık bir durumdur. Fakat çapak oluşumuna neden olan parametreleri ve nedenlerinin yorumlayabilmek oldukça önemlidir [13]. Bu sebeple, AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin iki farklı basınçta, dört farklı kesme hızında ve dört farklı frekans değerlerinde lazer ile kesme işlemi sonrasında numunelerin kenarlarında oluşan çapakların yükseklik değerleri ölçülmüş ve işleme parametrelerinin çapak oluşumlarına etkisi Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.

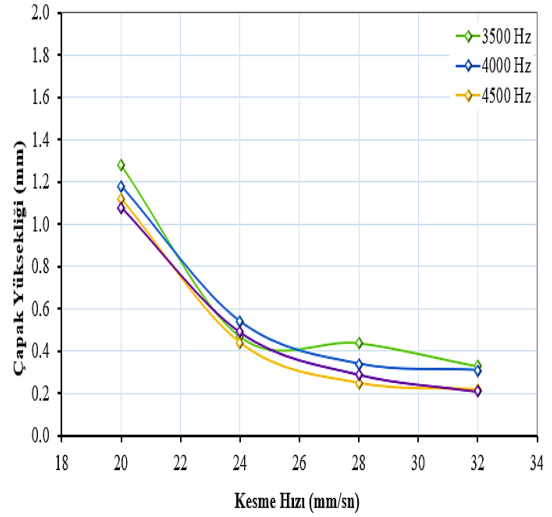
0.8 bar basınçta, dört farklı kesme hızında ve dört farklı frekans değerlerinde yapılan kesme işlemlerinde çapak oluşum miktarına etkileri Şekil 9'de verilmiştir. 20 mm/sn kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerlerinde yapılan kesme işlemlerinde 1.75 mm ile en yüksek çapak yüksekliği değeri ölçülmüştür.

Çünkü kesme hızının düşük olması, ısı transfer süresini artırmaktadır. Isının meydana getirdiği hasarın genişliği daha fazla olmasını sağlayacak, ergiyen malzeme miktarının fazla olması ergiyik olarak akan malzemenin de artması ve çapak oluşumunun daha fazla olmasını etkilemektedir. Frekans değerinin 5000 Hz çıkarılması ile yapılan kesme işlemlerinde çapak yükseklikleri ortalama %20.57 oranında azalarak 1.39 mm olmuştur. Özellikle kesme hızının 28 mm/sn ve 32 mm/sn çıkarılması ile yapılan deneylerde çapak yüksekliğine frekans değerlerinin kayda değer bir etkisinin

olmadığı görülmüştür. Ancak kesme hızının 32 mm/sn çıkarılması ile 5000 Hz frekans değerinde yapılan deney sonucunda çapak yüksekliğinin %79.86 azalması ile 0.28 mm ile en düşük değer ölçülmüştür.



Şekil 9. 0.8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri



Şekil 10. 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri

Şekil 10'da AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızında ve dört farklı frekans değerlerinde yapılan kesme işlemlerinde çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 20 mm/sn kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde çapak yüksekliği 1.28 mm ölçülmüştür. Frekans değerinin 5000 Hz çıkarılması ile yapılan kesme işlemlerinde çapak yüksekliği ortalama %15.63 oranında bir azalma olmuştur. Kesme hızının 32 mm/sn kadar çıkarılması ile yapılan kesme işlemlerinde 5000 Hz frekans değerinde çapak yüksekliği ortalama %85.55 oranında azalarak 0.21 mm ölçülmüştür. Yapılan çalışmada frekans değerinin çapak yüksekliği üzerine kayda değer bir etkisi olmazken, kesme hızının artması çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmuştur. Kesme hızının artırılması, lazer ışını tarafından çalışma alanına enerji birikimini artırdığı unutulmamalıdır. Çünkü kesme hızının artması, ısı transfer süresini azaltarak ısının meydana

getirdiği hasarın genişliği daha az olmasını sağlayacaktır. Hasarın genişliğinin daha az olması, çapak yüksekliğinin azalmasına yardımcı olacaktır [14].

#### 4 Sonuçlar

Yapılan çalışmada, farklı kesme parametrelerinde AISI 304 paslanmaz sac malzemesi lazer kesme işlemi sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü değerlerine, kerf genişliğine ve çapak yüksekliği üzerine etkileri değerlendirilmiş, elde edilen çalışmanın sonuçları aşağıda verilmiştir.

- ✓ AISI 304 paslanmaz sac malzemesini 32 mm/sn kesme hızında, 5000 Hz frekans, 0.8 bar ve bir bar basınç değerlerinde yapılan lazer kesme işlemi sonucu en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sırası ile 4.1 µm ve 5.5 µm olmuştur.
- ✓ 20 mm/sn kesme hızında, 3500 Hz frekans, 0.8 bar ve bir bar basınç değerlerinde yapılan lazer kesme işlemi sonucu en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri sırası ile 7.5 µm ve 9.08 µm ölçülmüştür.
- ✓ 0.8 bar ve bir bar basınçta 32 mm/sn kesme hızında, 3500 Hz frekans değerlerinde yapılan deneylerde en düşük kerf genişliği sırası ile 1.17 mm ve 1.33 mm olarak tespit edilmiştir.
- ✓ 20 mm/sn kesme hızında, 5000 Hz frekans, 0,8 bar ve bir bar basınçta yapılan deneylerde en yüksek kerf genişliği sırası ile 2.66 mm ve 2.81 mm olmuştur.
- ✓ Yapılan deneylerde 32 mm/sn kesme hızında, 5000 Hz frekans, 0.8 bar ve bir bar basınçta sırası ile 0.28 mm ve 0.21 mm ile en düşük çapak yüksekliğinin oluştuğu görülmüştür.
- ✓ 20 mm/sn kesme hızında, 3500 Hz frekans, 0.8 bar ve bir bar basınç değerlerinde yapılan lazer kesme işlemi sonucu en yüksek çapak yüksekliği sırası ile 1.75 mm ve 1.28 mm olarak belirlenmiştir.
- ✓ Çapak yüksekliğinde frekans değerlerinin kayda değer bir etkisi olmadığı görülmüştür.
- ✓ Kesme hızının artırılması yüzey pürüzlülüğünü, kerf genişliğini ve çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmuştur.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %17**

#### Kaynaklar

- [1] A. Parthibana, M. Chandrasekaranb, V. Muthuramanc and S. Sathishd, Optimization of CO2 laser cutting of stainless steel sheet for curved profile. *Materials Today: Proceedings*, 5 (6), 14531-14538, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.03.042>
- [2] Y. Zhang, L. Zhang, K. Luo, G. Sun, J. Lu, F. Dai and J. Zhong, Effects of laser shock processing on mechanical properties of laser welded ANSI 304 stainless steel joint. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 25, 285-292, 2012. <https://doi.org/10.3901/CJME.2012.02.285>
- [3] R. Biswas, A. S. Kuar, S. K. Biswas and S. Mitra, Artificial neural network modelling of Nd:YAG laser microdrilling on titanium nitride-alumina composite. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224, 473-482, 2010. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1576>
- [4] M. Madic and M. Radovanovic, Investigation into the effect of the cutting parameters on the burr height in CO2 laser nitrogen cutting of AISI 304 stainless steel. *Metalurgia International*, 17 (7), 74-78, 2012.
- [5] F. Mert, M. Tunç ve G. Sur, AISI 304 çeliğinin lazer ile kesilmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi. 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, sayfa 189-198, Baku, Azerbaijan, 29-30 September 2017.
- [6] N. Rajaram, J. Sheikh-Ahmad and S. H. Cheraghi, CO2 laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (4), 351-358, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00270-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00270-5)
- [7] J. M. Patel and D. M. Patel, Parametric investigation in CO2 laser cutting quality of Hardox 400 materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3, 5979-5984, 2011.
- [8] M. Madić, V. Marinković and M. Radovanović, Optimization of the kerf quality characteristics in CO2 laser cutting of AISI 304 stainless steel based on taguchi method. *Mechanical Technologies*, 19, 580-587, 2013. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.19.5.5529>
- [9] M. Ürgüplü ve S. Köksal, Lazer ile kesme işlemlerinde kesim kalitesine etki eden parametreler. 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, sayfa 865-874, Valencia, Spain, 03-05 June 2015.
- [10] M. Ay ve F. Yücelişli, Ti-6Al-4V alaşımının fiber lazer ile kesilmesinde işlem parametrelerinin kesim kalitesine etkisinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30 (2), 215-223, 2018.
- [11] R. Neimeyer, R. N. Smith and D.A. Kaminski, Effects of operating parameters on surface quality for laser cutting of mild steel. *Journal of Engineering for Industry*, 115, 359-362, 1993.
- [12] N. Muhammad, D. Whitehead, A. Boor and L. Li, Comparison of dry and wet fibre laser profile cutting of thin 316L stainless steel tubes for medical device applications. *Journal of Materials Processing Technology*, 210 (15), 2261-2267, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.08.015>
- [13] E. Bahçe, E. Kılıçkap ve C. Özel, Al-5005'in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisinin araştırılması. 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, sayfa 242-250, Balıkesir, Türkiye, 11-12 Kasım 2010.
- [14] A. Sen, B. Doloi and B. Bhattacharyya, Experimental studies on fibre laser micro machining of Ti-6Al -4V. 5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference, sayfa 1-7, Assam, India, 1-14 December 2014.







## Berilyum bakır alaşımında akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların aşınma performansı

### Wear performance of electroless Ni-P and Ni-B coatings on beryllium copper alloy

Ferda Mindivan<sup>1</sup> , Harun Mindivan<sup>2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Biyomühendislik Bölümü, 11210, Bilecik, Türkiye

<sup>2</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 11210, Bilecik, Türkiye

#### Öz

Berilyum bakır (Be-Cu) alaşımları yüksek sıcaklık iletkenliği ve nispeten yüksek mukavemetleri ile hızlı kalıp üretimi için uygun malzemelerdir. Ancak, düşük aşınma ve oksidasyon direnci özellikleri nedeniyle kullanımları sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada Be-Cu alaşımı üzerine akımsız Nikel-Fosfor (Ni-P) ve Nikel-Bor (Ni-B) kaplamalar hazırlanmış ve aşınma özellikleri kaplanmamış alaşım ile karşılaştırılmıştır. Kaplamaların mikroyapı görüntüleri Ni-P kaplamanın yaklaşık 12 µm kalınlığında, düz bir yüzey sergilediği göstermiştir. Ni-B kaplamanın ise yaklaşık 7-8 µm ortalama kalınlıkta, pürüzlü ve dalgalı bir yüzey görüntüsüne sahip olduğu belirlenmiştir. XRD analiz sonuçları ile akımsız kaplamaların amorf ve kristalin bölgelerin karışımından ibaret olduğu ve Ni-B kaplamanın Ni-P kaplamaya kıyasla daha amorf yapı sergilediği tespit edilmiştir. Akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların sertlik değerleri kaplanmamış alaşıma nazaran sırasıyla 2.2 ve 3.7 kat artmıştır. Akımsız Ni-B kaplamanın sertliğindeki artışa bağlı olarak, her iki yük altında (5 and 7.5 N) aşınma kaybında % 77 oranında azalma olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Berilyum bakır alaşımı, Akımsız Ni-P kaplama, Akımsız Ni-B kaplama, Kuru aşınma

#### 1 Giriş

Moldmax HH, plastik enjeksiyon kalıp uygulamalarında soğutma performansını arttırmak amacıyla kullanılan bir Be-Cu kalıp alaşımıdır [1]. Düşük aşınma direnci ve oksidasyon Be-Cu alaşımlarının kullanımını sınırlayan en önemli etkenlerdir [2]. Çeşitli kaplamalar arasında düşük aşınma hızı ve korozyon direnci gibi mükemmel fonksiyonel özelliklerinden dolayı sert krom (Cr) kaplama tercih edilmektedir. Ancak, altı değerlikli krom Cr (VI) içeren elektrolitlerin kullanımı ciddi çevre ve sağlık sorunları nedeniyle günümüzde kısıtlanmıştır. Bu kısıtlamalar Avrupa'da REACH (Kimyasalların Kaydı, Değerlendirilmesi, Yetkilendirilmesi ve Kısıtlanması), ABD'de EPA (Çevre Koruma Ajansı) ve OSHA (İş Güvenliği ve Sağlık İdaresi) tarafından düzenlenmektedir. Doğası gereği kanserojen ve cilt tahrişine neden olan Cr (VI)

#### Abstract

Beryllium copper (Be-Cu) alloys are suitable materials for mold production speedy (rapid mold production) with their high temperature conductivity and relatively high strength. However, their use has been limited due to their low wear and oxidation resistance properties. In this study, electroless Nickel-Phosphorus (Ni-P) and Nickel-Boron (Ni-B) coatings were prepared on the Be-Cu alloy and the wear properties were compared with the uncoated alloy. Microstructure images of the coatings showed that the Ni-P coating exhibited a flat surface with a thickness of about 12 µm. Ni-B coating had a rough and wavy surface with an average thickness of approximately 7-8 µm. It was determined that the electroless coatings consisted of a mixture of amorphous and crystalline regions with the XRD analysis results and the Ni-B coating exhibited more amorphous structure compared to the Ni-P coating. The hardness values of electroless Ni-P and Ni-B coatings increased by 2.2 and 3.7 times, respectively, compared to the uncoated alloy. Depending on the increase in the hardness of the electroless Ni-B coating, it was determined that there was a 77% reduction in wear loss under both loads (5 and 7.5 N).

**Keywords:** Beryllium copper alloy, Electroless Ni-P coating, Electroless Ni-B coating, Dry wear

kaplama sırasında açığa çıkan gaz, akciğer sorunlarına da neden olmaktadır. Solunum cihazı kullanımı ve egzoz sistemlerinin çalıştırılması gibi güvenlik önlemleriyle toksik Cr (VI) kalıntı elektrolitin bertaraf edilmesi masraflıdır. Ayrıca sert krom kaplamaların performansı, mikroçatlaklara ve kaplama sırasında gelişen kalıntı çekme gerilmelerine de bağlıdır. Sert krom kaplamalar, kristal yapıdaki değişiklikler nedeniyle üretim sırasında sürünmeye uğrayarak ya mikroçatlaklara ya da kalıntı çekme gerilmelere sahip kaplamaların oluşmasına yol açmaktadırlar. Çatlaklar tipik olarak yaklaşık 2 µm derinliğe sahiptir, ancak çatlaklar bir araya gelerek farklı derinlik, boyut ve yoğunlukta desenler oluşturabilirler. Diğer taraftan, kaplama sırasında oluşan bu mikroçatlaklar, sert krom kaplamanın aşınma ve korozyon direncini olumsuz yönde etkileyebilmektedir [3]. Sonuç olarak, krom kaplamayla karşılaştırılabilir ve hatta daha

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hmindivan@gmail.com (H. Mindivan)

Geliş / Received: 17.11.2021 Kabul / Accepted: 21.01.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1024914

üstün fonksiyonel özellikler sergileyen ancak ciddi sağlık sorunu riski olmayan alternatif kaplamalar üzerine literatürde pek çok çalışma yapılmıştır [4]. Akımsız nikel kaplamalar, üniform kaplama kalınlığı, yüksek sertlik, aşınma ve korozyon direnci, lehimlenebilirlik ve kaynak kabiliyeti, yağlayıcılık gibi özelliklerinden dolayı elektronik, bilgisayar, otomotiv, uçak-uzay, kimya, plastik, optik, vb. birçok alanda kullanım olanağı sunmaktadır. Akımsız kaplama çeşitlerinden Ni-P ve Ni-B kaplamalar en bilinenler arasındadırlar. Hipofosfit kullanılarak akımsız nikeli indirmek yaygın olarak bilinse de, yakın zamanda borohidrit ile indirgeme işlemi de kullanılmaya başlamıştır. Bunun sebebi ise diğer indirgen maddelerle kıyaslandığında borohidrit iyonu en güçlü indirgen olması ve borohidritin indirgediği akımsız nikel kaplamaların sertlik ve aşınma direncinin daha yüksek olmasıdır.

Bu çalışmada Be-Cu alaşımı yüzeyine Ni-P ve Ni-B akımsız kaplamalar yapılarak sertlik ve aşınma gibi yüzey özellikleri incelenerek, kaplanmamış Be-Cu alaşımı ile karşılaştırılmıştır.

## 2 Materyal ve metod

Akımsız kaplama işlemleri için altlık malzeme olarak Moldmax HH Be-Cu alaşımı (20 x 10 x 5 mm) kullanılmıştır. Bu altlık malzemenin kimyasal bileşimi ağırlıkça (ağ.) % değerleri şeklinde Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Be-Cu alaşımının kimyasal bileşimi

Element	Be	Co + Ni	Cu
Ağ.%	1.9	0.25	Kalan

Be-Cu alaşım örnekleri, silisyum karbür (SiC) zımparalar kullanılarak sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 numaralı zımpara kağıtları ile ıslak zımparalanmış, daha sonra örneklerin yüzeyleri alkolle temizlenerek 1 mikron Alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) solüsyonu ile parlatılarak kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.

Kaplama tabakasının homojen ve düz olması arzu edildiğinden altlık malzemeye bazı ön işlemler uygulamak gerektiğinden, kaplama öncesi Be-Cu levhalar ağ. %10 KOH alkali temizleyici içerisinde 5 dk. boyunca 60°C’ de tutulmuştur. Ardından kaplamaya hazır aktif bir yüzey elde etmek için 30 s boyunca hacimce %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilip [5], saf su ile yıkanarak kaplama banyosuna yerleştirilmiştir.

Daha önce AISI 316L paslanmaz çelik üzerine Ni-P, Ni-B ve Ni-P/Ni-B dubleks [6], AA7075 alüminyum alaşımı üzerine Ni-P/Ni-B dubleks [7] ve saf Ti üzerine Ni-B [8] çalışmalarında optimize edilmiş kaplama koşulları bu çalışmada kullanılan hem Ni-P hem de Ni-B kaplama banyolarını oluşturmak için kullanılmıştır. 5 g/L nikel, 40 g/L sodyum hipofosfit (NaH<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>) içeren ticari bir çözelti (DURNI-COAT DNC 520-9) kullanılarak akımsız Ni-P kaplama banyosu hazırlanmıştır. Akımsız Ni-B kaplamanın banyo bileşimi ve kaplama parametreleri ise Tablo 2’de verilmiştir. Nikel kaynağı olarak nikel klorür heksahidrat (NiCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O), indirgeme elemanı olarak sodyum bor hidrür (NaBH<sub>4</sub>), kompleksleştirici etilen diamin (C<sub>2</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>), çözelti pH’ sını ayarlamak için sodyum hidroksit (NaOH) ve

çözeltinin kararlılığını sağlamak için talyum asetat (CH<sub>3</sub>COOTl) kullanılmıştır. 250 ml’ lik bir beherde, yağ banyosu içerisinde bulunan akımsız Ni-P ve Ni-B kaplama banyo karışımlarının çalışma koşulları Tablo 3’de verilmiştir. Kaplamalar manyetik karıştırıcı üzerinde, 250 dev/dk. karıştırma hızında, 60 dk. süreyle, 5 mm çapında ve 2 cm uzunluğunda bir politetrafloroetilen (PTFE) esaslı manyetik bir balık yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 2.** Akımsız Ni-B kaplama banyosu bileşenleri

NaBH <sub>4</sub>	1 g/l
NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	30 g/l
C <sub>2</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	90 ml/l
NaOH	90 g/l
CH <sub>3</sub> COOTl	18 mg/l

**Tablo 3.** Akımsız Ni-P ve Ni-B kaplama koşulları

	Ni-P	Ni-B
Sıcaklık	90°C	95 °C
pH	4.6	14
Süre	60 dk.	60 dk.
Karıştırma Hızı	250 dev/dk.	250 dev/dk.

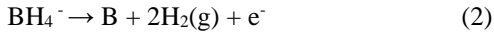
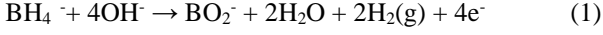
Kaplamaların mikroyapısı Nikon marka Eclipse LV150 model optik metal mikroskobu (OM) kullanılarak incelenmiştir. Kaplamaların faz analizleri Panalitical X-ışını kırınım ölçer (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümlerinde  $\lambda = 1.54059 \text{ \AA}$  dalga boyuna sahip CuK $\alpha$  ışınımı kullanılmıştır. Akımsız Ni-P ve Ni-B ile kaplanan örneklerin sertlik testleri, yüzeylere dik yönde kesit buyunca kesilip metalografik işlemlerle hazırlandıktan sonra Shimadzu HVM mikrosertlik cihazında Vickers batıcı uç kullanılarak 10 g yük altında yapılmıştır.

Bu çalışmada Be-Cu alaşımı, Ni-P ve Ni-B kaplamaların oda sıcaklığında doğrusal zıt yönlü düzlem-bilye aşınma (reciprocating ball-on-flat) cihazında aşınma deneyleri yapıp, sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Aşınma deneyleri iki farklı normal yükte (5 ve 7.5 N), 1,9 cm/s hızda, 10 mm çapında alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) bilye ile yapılmıştır. Toplam aşınma mesafesi 57.5 m’dir. Deneyler sırasında ortamın bağıl nem değeri %30’ dur. Aşınma deneyleri öncesi numunelerin yüzeyleri ve deneyde kullanılan bilyeler alkol ile temizlenmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma izlerinin 2 boyutlu profilleri Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile 3 boyutlu profilleri ise Nikon görüntüleme yazılımı NIS-Elements ile elde edilmiştir. Ayrıca kaplamaların yüzey pürüzlülüğü de 2 boyutlu profil cihaz ile ölçülmüştür. Profillerden elde edilen R<sub>a</sub>: aritmetik ortalama pürüzlülük değerini, R<sub>y</sub>: değerlendirme uzunluğundaki en yüksek tepe-çukur parametresini, R<sub>z</sub>: ortalama maksimum yüksekliği, R<sub>q</sub>: aritmetik ortalama sapmaların karekökünü temsil etmektedir.

## 3 Bulgular ve tartışma

Akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların enine kesit ve yüzey OM görüntüleri ve yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. Ni-P kaplama, yaklaşık 12  $\mu\text{m}$  kalınlığa sahip düz bir yüzey sergilerken, Ni-B kaplama ise yaklaşık 7-8  $\mu\text{m}$  ortalama kalınlığa sahip olup pürüzlü ve dalgalı bir yüzey görüntüsü sunmuştur (Şekil 1). Akımsız Ni-

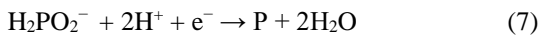
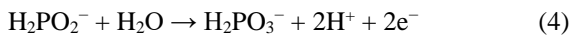
P kaplamasının yüksek yoğunluklu, gözeneksiz ve pürüzsüz yüzey görüntüsü (Şekil 1a ve Şekil 2) literatürde verilen akımsız Ni-P kaplamaların yüzey görüntüleri ile uyumludur [9]. Akımsız Ni-B kaplama ise karnabaharimsi birçok küresel tanenin sık, kompakt ve pürüzlü yüzey görüntüsü (Şekil 1b ve Şekil 2) daha önce yapılan çalışmalarla tutarlı olduğu belirlenmiştir [10]. Akımsız Ni-B kaplamada indirgeyici olarak borhidrür (BH<sub>4</sub><sup>-</sup>) kullanılmıştır. Borhidrür aşağıda Denklem (1) ve Denklem (2)'de gösterildiği gibi iki yolla oksitlenir, Denklem (3)'de ise nikel metalinin oluşumu gösterilmektedir.



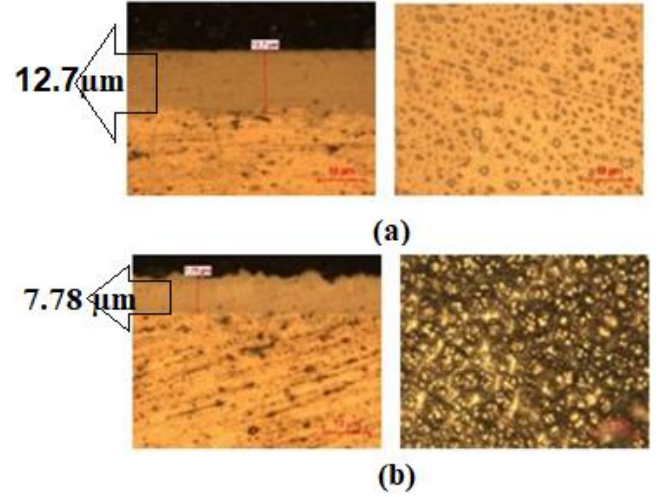
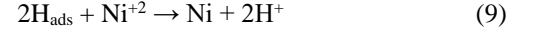
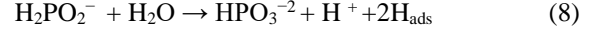
Denklem (1)'e göre, borhidrürden dört elektron açığa çıkar. Elektronları alarak, nikel iyonları indirgenerek nikel metali oluşur (Denklem (3)). Bor atomları Denklem (2)'ye göre birirmektedir. Sonuç olarak, altlık üzerinde Ni-B alaşımı oluşmaktadır [5].

Akımsız nikel kaplama çözeltilerinde hipofosfit kullanılarak meydana gelen kimyasal reaksiyonlar için de çeşitli mekanizmalar önerilmiştir. En yaygın olarak kabul edilen mekanizmalar aşağıdaki denklemlerle gösterilmiştir [11].

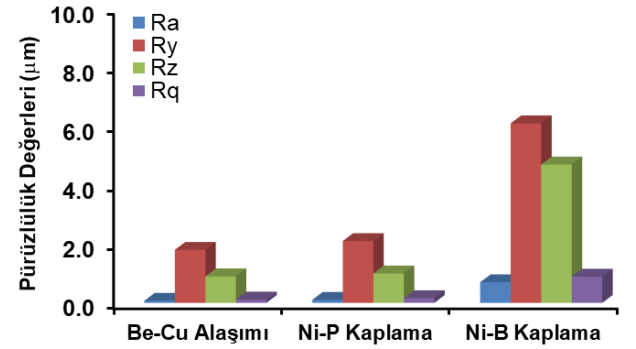
- Hipofosfitin yüzeyde meydana gelen katalitik oksidasyonu ile nikel ve hidrojen iyonlarının indirgendiği elektrokimyasal mekanizma aşağıda Denklem (4), (5), (6) ve (7) ile gösterilmiştir:



- Yüzeyde adsorbe edilen hipofosfit molekülünün katalitik dehidrojenasyonu sonucu atomik hidrojenin açığa çıktığı atomik hidrojen mekanizması aşağıda Denklem (8), (9) ve (10) ile gösterilmiştir. Adsorplanan aktif hidrojen daha sonra yüzeydeki nikeli indirgemektedir (Denklem (9)). Aynı zamanda, adsorplanan hidrojenin bir kısmı, katalitik yüzeydeki hipofosfitin küçük bir miktarını suya, hidroksil iyonuna ve fosfora indirgemektedir (Denklem (10)).



Şekil 1. Akımsız (a) Ni-P ve (b) Ni-B kaplamaların kesit ve yüzey OM görüntüleri

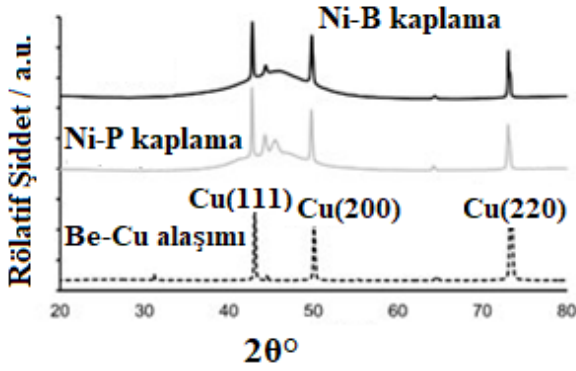


Şekil 2. Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey topografyaları

Akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların ve karşılaştırma yapılacak olan Be-Cu alaşımının XRD paternleri Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'de 2θ=42,99' de Cu (111), 2θ=50,00' de Cu (200) ve 2θ=73,26' de Cu (220) düzlemlerine ait kristal pikleri görülmektedir. Be-Cu alaşıma ait Şekil 3'de verilen düzlem pikleri daha önce literatürde verilen Be-Cu alaşımının kristal pikleri ile uyumludur [12]. Akımsız kaplamaların XRD paternlerinde ise kristal yapının izlerini sunan piklerin varlığı ile beraber kısmen genişlemiş yani amorf yapının da mevcudiyetini gösteren piklerin varlığı açıkça görülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen



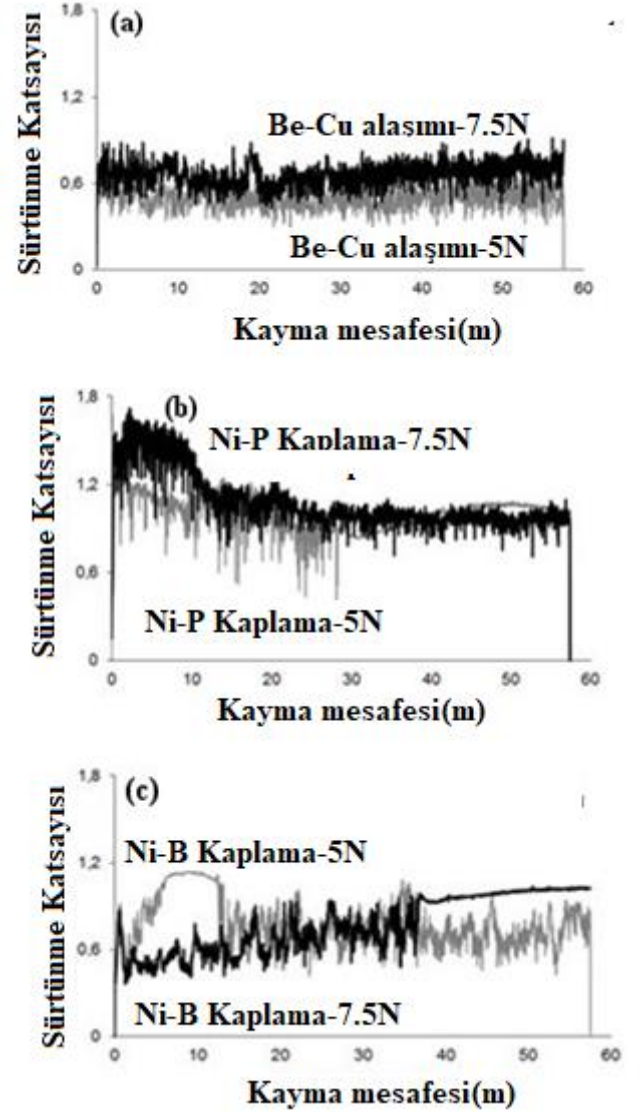
akımsız kaplamaların hem amorf hem de kristal bölgelere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç, daha önce farklı altlık malzemeler üzerine yapılan çalışmalarla da rapor edilmiştir [13, 14]. Bunun yanında, bazı çalışmalarda kaplamaların XRD paternlerinde geniş bir pik ile yalnızca amorf yapının varlığı belirlenmiştir [15, 16]. Bu çalışmada da akımsız Ni-B kaplamada kısmi genişleşmiş bölgede kristalin piklerden biri kaybolmaktadır ve bu yüzden Ni-B kaplama Ni-P kaplamaya göre daha amorf yapı sergilemektedir.



Şekil 3. Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların XRD paternleri

Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların sertlikleri sırasıyla 202 HV<sub>0,01</sub>, 460 HV<sub>0,01</sub> ve 760 HV<sub>0,01</sub> olarak ölçülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen mikrosertlik sonuçları daha önce farklı alaşımlar üzerine yapılan akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların mikrosertlik sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. Örneğin Zhang vd. [9], AZ91D Mg alaşımı üzerine yaptıkları Ni-P kaplamanın 400 HV<sub>0,01</sub> ve Ni-B kaplamanın ise 650 HV<sub>0,01</sub> olarak rapor etmişlerdir. Ni-B kaplamanın sertliğindeki artış, nikel matriste bor tarafından arayer katı çözeltinin oluşumuna bağlanabilir [17].

Be-Cu alaşımı ve kaplamaların sürtünme katsayısı-kayma mesafe eğrileri Şekil 4'de verilmektedir. Kayma mesafesi ile sürtünme katsayısı grafiği en yüksek salınımla Be-Cu alaşımı sergilemiştir (Şekil 4a). Ni-P kaplama her iki yük (5 ve 7.5 N) altında yaklaşık ilk 5 m'lik mesafede, sürtünme katsayısı önce artıp, ardından azalan kararlı bir davranış sergileyerek benzer sürtünme davranışı göstermiştir (Şekil 4b). En yüksek sertliğe sahip olan Ni-B kaplama 5 N yük altında 12 m kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısı aniden azalıp, deneyin sonuna kadar geniş bir salınımlı göstermiştir (Şekil 4c). Ancak 7.5 N yük altında ise Ni-B kaplama 35 m kayma mesafesinden sonra en düşük salınımlı olacak şekilde sürtünmeye devam etmiştir.

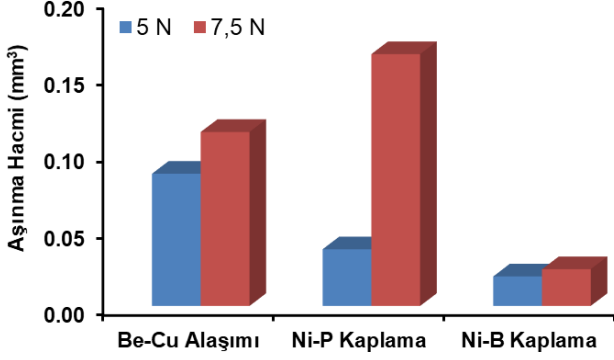


Şekil 4. (a) Be-Cu alaşımı, akımsız (b) Ni-P ve (c) Ni-B kaplamaların kuru ortam sürtünme katsayısı değerlerinin mesafeye bağlı değişimi

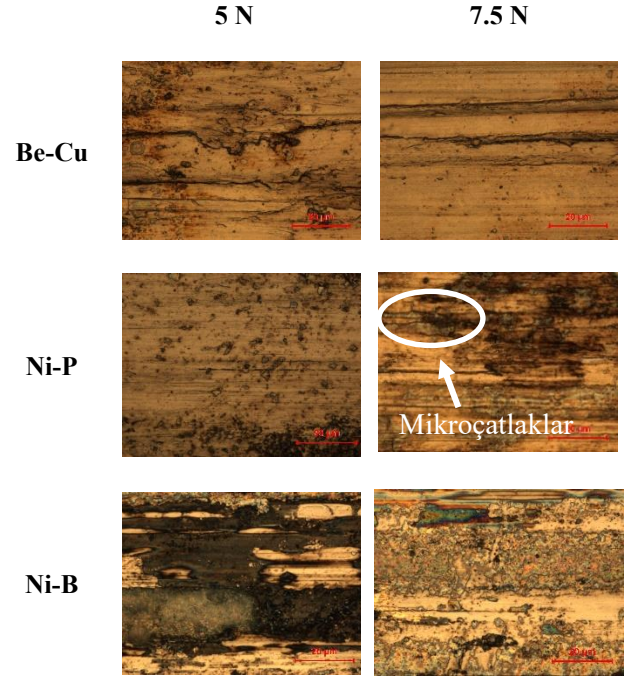
Şekil 5 kuru ortam aşınma deneylerinde Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların aşınma kayıpları verilmektedir. Kuru ortam aşınma koşulları altında her iki yük altında Ni-P kaplamaya kıyasla Ni-B kaplama daha iyi aşınma direnci sergilemektedir. Şekil 6'da aşınma iz genişliği ve mekanik kararlılığı dikkate alındığında, Ni-B kaplama daha küçük aşınma iz genişliği ve daha iyi mekanik kararlılık gösterdiği belirlenmiştir. Daha yüksek yüklerde Be-Cu alaşımı ile, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların farklı aşınma yüzeyi morfolojileri sergiledikleri tespit edilmiştir (Şekil 7). Be-Cu alaşımın kayma yönünde abrasif çizikler içeren geniş aşınma izi gözlenmiştir (Şekil 7). 7.5 N yük altında aşınma sırasında Ni-P kaplamanın temas yüzeyinde yüksek sürtünme katsayısı (Şekil 4b) ve çatlamlar (Şekil 7) aşınma miktarını artıran en



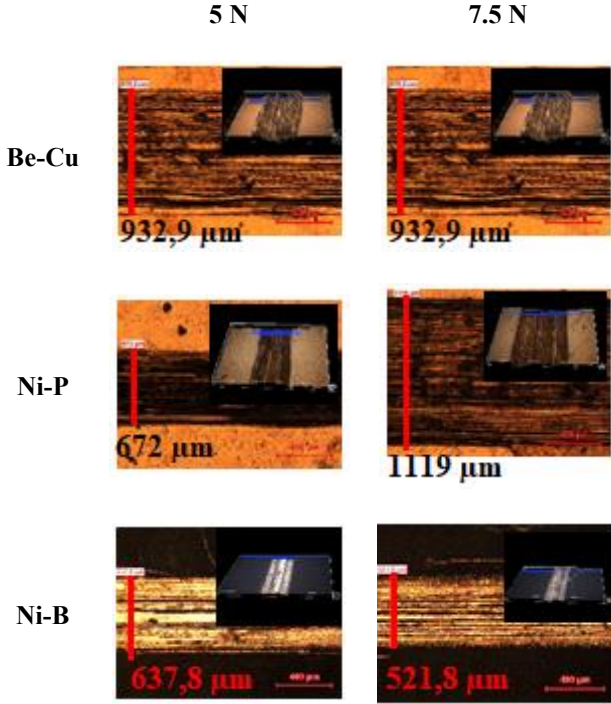
önemli etkenler olmuştur. Ancak, Ni-B kaplamanın aşınma izi içerisinde kayma yönünde koyu renkte kaplamanın hala mevcut olduğu gözlenmiştir (Şekil 7). Ni-B kaplamada belirlenen daha yüksek aşınma direnci, bu kaplamanın yüksek sertliğine bağlı olarak daha az plastik deformasyona uğraması ve yağlayıcı özelliği ile açıklanabilir [18].



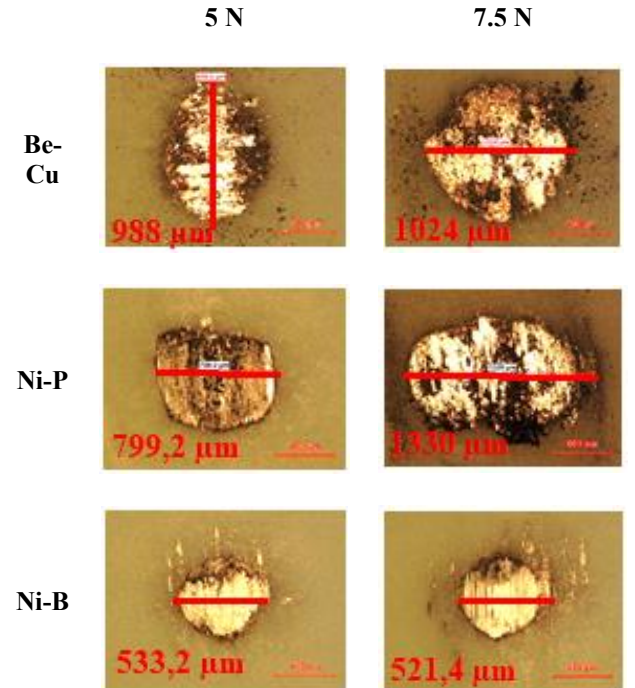
Şekil 5. Kuru ortam aşınma koşulları altında Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların aşınma kayıpları.



Şekil 7. Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların aşınma izlerinin yüksek büyütme OM görüntüleri



Şekil 6. Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamaların aşınma izlerinin düşük büyütme OM görüntüleri ve 3-D yüzey topografik profilleri



Şekil 8. Be-Cu alaşımı, akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamalara temas eden karşı malzemelerin temas yüzey görüntüleri

Karşı malzeme olarak kullanılan  $Al_2O_3$  bilyelerin aşınma yüzeyleri Şekil 8’de verilmektedir. Şekil 5’e bakıldığında 5 N yük altında Be-Cu alaşıma nazaran Ni-P ve Ni-B kaplamalarda azalan aşınma hacmiyle beraber bilyelerin yüzeyindeki aşınma da azalmıştır. Ancak 7.5 N yük altında Be-Cu alaşıma göre Ni-P kaplamadaki aşınma hacmindeki artış ile aşınan  $Al_2O_3$  bilye çapının arttığı dolayısıyla bilyenin daha çok aşındığı anlaşılmaktadır.

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada ticari kalitede Be-Cu alaşımı üzerine akımsız Ni-P ve Ni-B kaplamalar oluşturulmuştur. Bu kaplamalarda yapılan mikroyapı incelemeleri, mikrosertlik ölçümleri ve aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

1. Akımsız kaplamaların mikroyapı görüntüleri Ni-P kaplamanın düz, Ni-B kaplamanın ise karnabahar-vari küresel tanelerden oluşan pürüzlü bir yüzey görüntüsü verdiğini göstermiştir. Yüzey pürüzlülük analizi de en pürüzlü yüzeye Ni-B kaplamanın sahip olduğunu destekleyen sonuçlar vermiştir.

2. Aynı sürede yapılan kaplama işlemi ile, Ni-P kaplama yaklaşık 12  $\mu m$ , Ni-B kaplama ise yaklaşık 7-8  $\mu m$  ortalama kaplama kalınlığı değerleri göstermişlerdir.

3. XRD analizi ile, akımsız kaplamaların amorf ve kristal yapıların bir karışımından oluştuğunu, Ni-B kaplamanın Ni-P kaplama ile karşılaştırıldığında, daha amorf bir yapı sergilediği aynı analiz sonuçlarından tespit edilmiştir.

4. Yapılan mikrosertlik testi sonrasında elde edilen sonuçlar kaplamasız alaşım ile karşılaştırıldığında, akımsız Ni-P kaplamanın 2.2 kat ve Ni-B kaplamanın ise 3.7 kat önemli miktarda sertliği artırdığı sonucunu ortaya çıkarmıştır.

5. Kuru ortam aşınma deneyleri, her iki yük altında Ni-P kaplamaya kıyasla Ni-B kaplamanın, daha küçük aşınma iz genişliği, aşınma hacminde görülen ciddi azalma, aşınma sırasında yağlayıcı özelliğini kaybetmeden sergileyebildiğini gösteren görüntüler ile bu kaplamanın daha iyi mekanik kararlılık gösterdiğini ortaya koymuştur.

#### Teşekkür

Bu çalışma Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2021-01.BŞEÜ.01-02 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %15

#### Kaynaklar

- [1] Z.W. Zhong, M.H. Leong, X.D. Liu, The wear rates and performance of three mold insert materials, *Materials and Design*, 32, 643–648, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.008>.
- [2] J.C. Avelar-Batista Wilson, S. Banfield, J. Eichler, A. Leyland, A. Matthews, J. Housden, An investigation into the tribological performance of Physical Vapour Deposition (PVD) coatings on high thermal

- conductivity Cu-alloy substrates and the effect of an intermediate electroless Ni–P layer prior to PVD treatment, *Thin Solid Films*, 520, 2922–2931, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.11.034>.
- [3] B. Podgornik, O. Massler, F. Kafexhiu, M. Sedlacek, Crack density and tribological performance of hard-chrome coatings, *Tribol. Int.*, 121, 333–340, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.055>.
- [4] H. Mindivan, Corrosion and tribocorrosion behaviour of WC/C coating on beryllium-copper mould alloy, *Mater. Today: Proc.*, 27 (4), 3114–3118, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.726>.
- [5] H. Ogihara, T. Katayama, T. Saji, Electroless deposited robust Ni–B films coated with trimethylsiloxysilicate exhibit superhydrophobicity, *J. Mater. Chem.*, 21, 14890–14896, 2011. <https://doi.org/10.1039/C1JM12303C>
- [6] F. Mindivan, AISI 316L paslanmaz çeliğin yüzey özelliklerine akımsız Ni-B, Ni-P/Ni-B ve Ni-B/Ni-P kaplamaların etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2021.
- [7] H. Mindivan, Tribocorrosion behavior of electroless Ni-P/Ni-B duplex coating on AA7075 aluminum alloy, *Ind. Lubr. Tribol.*, 71(2), 630–635, 2019. <https://doi.org/10.1108/ILT-05-2018-0177>
- [8] F. Mindivan, H. Mindivan, C. Darcan, Electroless Ni-B coating of pure titanium surface for enhanced tribocorrosion performance in artificial saliva and antibacterial activity. *Tribol. Ind.*, 39(2), 270–276, 2017. <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.02.15>
- [9] J. Zhang, Z.-H. Xie, H. Chen, C. Hu, L. Li, B. Hu, Z. Song, D. Yan, G. Yu, Electroless deposition and characterization of a double-layered Ni-B/Ni-P coating on AZ91D Mg alloy from eco-friendly fluoride-free baths, *Surf. Coat. Technol.*, 342, 178–189. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.02.105>.
- [10] U. Matik, Effect of crystallization on wear and corrosion behavior of electroless Ni-P/Ni-B duplex coating on ferrous PM compacts, *Kov. Mater.*, 58, 247–254, 2020. [https://doi.org/10.4149/km\\_2020\\_4\\_247](https://doi.org/10.4149/km_2020_4_247)
- [11] R.C. Agarwala, V. Agarwala, Electroless alloy/composite coatings: A review, *Sadhana*, 28, 475–493, 2003. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02706445>.
- [12] H. Zhang, Y. Jiang, J. Xie, Y. Li, L. Yue, Precipitation behavior, microstructure and properties of aged Cu-1.7 wt% Be alloy, *J. Alloys Compd.*, 773, 1121–1130, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.09.296>.
- [13] I. Baskaran, R.S. Kumar, T.S.N. Sankara Narayanan, A. Stephen, Formation of electroless Ni–B coatings using low temperature bath and evaluation of their characteristic properties, *Surf. Coat. Technol.*, 200,6888–6894, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.10.013>.
- [14] M. Czagány, P. Baumli, G. Kaptay, The influence of the phosphorous content and heat treatment on the nano-micro-structure, thickness and micro-hardness of electroless Ni-P coatings on steel, *Appl. Surf. Sci.*,

- 423:160–169, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.168>.
- [15] K. Krishnaveni, T.S.N. Narayanan Sankara, S.K. Seshadri, Electroless Ni-B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance, *Surf. Coat. Technol.*, 190, 115-121. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.038>.
- [16] F. Madah, C. Dehghanian, A.A. Amadeh, (). Investigations on the wear mechanisms of electroless Ni-B coating during dry sliding and endurance life of the worn Surfaces, *Surf. Coat. Technol.*, 282:6–15, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.003>.
- [17] F. Mindivan, H. Mindivan, The study of electroless Ni-P/Ni-B duplex coating on HVOF-sprayed martensitic stainless steel coating, *Acta Phys. Pol.*, 131 (1), 64-67, 2017. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.64>
- [18] H. Mindivan, Tribocorrosion behavior of electroless Ni-P/Ni-B duplex coating on AA7075 aluminum alloy, *Ind. Lubr. Tribol.*, 71 (5), 630-635, 2019. <https://doi.org/10.1108/ILT-05-2018-0177>.





## Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışına alüminyum ilavesinin ve östemperleme ısıl işleminin etkilerinin incelenmesi

### Investigation of the effects of aluminum addition and austempering heat treatment on wear behavior of ductile cast irons

Rıdvan Gecü<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul, Türkiye

#### Öz

Alüminyum (Al) içermeyen ve ağırlıkça %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirler kum kalıba döküm yöntemiyle üretilmiştir. Üretim sonrası, 900 °C'de 90 dk süreyle östenit sahada tutulan numuneler, 300 °C'ye hızla soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 60 dk boyunca bekletilmiştir. Yapılan östemperleme işleminin, dökme demirlerin mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi amacıyla, optik mikroskop, SEM, sertlik ve disk üzeri bilya tipi aşındırma cihazları kullanılmıştır. Al miktarı arttıkça, matristeki ferrit oranı ve grafit miktarının arttığı, buna karşılık grafitlerin küreselliğinin bozulduğu belirlenmiştir. Al ile alaşımlandırma, malzemeye daha yüksek sertlik ve daha iyi aşınma dayanımı kazandırmıştır. Östemperleme sonrası numunelerde, kalıntı östenit ve beynitik ferrit matris yapısı elde edilmiştir. %3 Al içeren numunede, östemperleme sonrası oluşan beynit miktarının azaldığı görülmüştür. Numunelerin aşınma yüzeylerinde abrazif ve adhezif aşınmanın dominant karakterde olduğu belirlenmiştir. %3 Al ile alaşımlama aşınma direncini artırırken, östemperleme işlemi alaşımsız numunenin aşınma dayanımında daha iyi sonuç vermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Östemperleme, Küresel grafitli dökme demir, Aşınma, Alüminyum, Alaşımlama

#### 1 Giriş

Dökme demirlerin mikroyapıları, kimyasal bileşimlerine, döküm parametrelerine ve soğuma koşullarına bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir [1]. Beyaz, gri, temper ve sfero gibi farklı çeşitleri bulunan dökme demirlerin, uygulamada arzu edilen özellikleri sağlayacak şekilde seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Sfero, dökme demir mikroyapısı, ferritik, perlitik veya ferritik/perlitik bir matris üzerinde küresel grafit parçacıkları içermektedir. Bu nedenle küresel grafitli dökme demir olarak da adlandırılmaktadır. Grafitlerin küreselleştirilmesi, magnezyum, kalsiyum, seryum gibi elementlerin ergiyik dökme demire belli oranlarda ilavesiyle gerçekleşmektedir [2]. Küresel grafitli dökme demirlerin özgün mikroyapısı; aşınma dayanımı, korozyon direnci, sertlik, yorulma dayanımı, süneklik, işlenebilirlik gibi birçok farklı özelliği aynı anda sergilemesini sağlamaktadır [3]. Mevcut özellikleri sayesinde otomotiv ve enerji sektörlerinde yaygın olarak

#### Abstract

Ductile cast irons, which do not contain aluminum (Al) and contain 3 wt.% Al, were produced by the sand mold casting method. After production, the samples kept in the austenite field at 900 °C for 90 min were rapidly cooled to 300 °C and held at this temperature for 60 min. Optical microscope, SEM, EDS, and ball-on-disc type wear devices were used to examine the effect of austempering on the microstructure and wear properties of the cast irons. It was determined that as the amount of Al increased, the ferrite ratio and the amount of graphite in the matrix increased, whereas the nodularity of the graphite deteriorated. Alloying with Al provided higher hardness and better wear resistance. After austempering, retained austenite and bainitic ferrite matrix structure were obtained. It was observed that the amount of bainite formed after austempering decreased in the sample containing 3% Al. It was determined that abrasive and adhesive wear was predominant on wear surfaces of the samples. While alloying with 3% Al increased the wear resistance, austempering process gave better results in the wear resistance of the unalloyed sample.

**Keywords:** Austempering, Ductile cast iron, Wear, Aluminum, Alloying

kullanılan küresel grafitli dökme demirler, işlem parametreleri değiştirilerek veya ilave bir ısıl işlem uygulanarak, daha da güçlendirilebilmektedir [4]. Malzemenin 825–950 °C sıcaklıkları arasında östenit sahaya ısıtılıp burada bir süre bekletildikten sonra 280–550 °C sıcaklıkları arasına soğutulmasıyla gerçekleştirilen östemperleme işlemi, malzeme mikroyapısını değiştirerek, özelliklerde iyileştirme sağlayan yöntemlerden biridir [5]. Soğutma işleminin gerçekleştirileceği ortam olarak, tuz banyosu, sıcak yağ veya ergiyik metal kullanılabilir. Beynitik/östenitik bir matris ortaya çıkaran östemperleme işleminde, martenzit veya farklı türlerde karbür parçacıkları oluşması da mümkündür. Hangi fazların oluşup oluşmayacağı, malzemenin kimyasal bileşimi ve ısıl işlem parametreleriyle belirlenmektedir [6].

Dökme demir içindeki grafitin hacmi, boyutu, dağılımı, küreselliği ve sayısı sfero dökümlerin mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [7]. Alaşım elementleri de

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gecur@yildiz.edu.tr (R. Gecü)

Geliş / Received: 07.02.2022 Kabul / Accepted: 16.02.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1069484



matris yapısını veya grafitin küreselliğini değiştirerek mekanik özellikleri etkileyebilmektedir. Alüminyum, özellikle sfero demirlerin hafif, ince cidarlı dökümlerinde en çok talep edilen alaşım elementlerinden biridir. Maliyet uygunluğu ve malzeme erişilebilirliği nedeniyle, küresel grafitli dökme demirlerin Al ile alaşımlanması endüstriyel açıdan da uygun bulunmuştur [8]. Al alaşımlı sfero dökümler, Al içermeyenlere göre aşınma, oksidasyon, korozyon ve yorulma direnci, tokluk, sertlik ve işlenebilirlik özelliklerinde iyileştirme göstermektedir [9]. Ayrıca, dökme demirlerin üretimi sırasında grafit CO ve CO<sub>2</sub>'ye ayrışabildiğinden, Al ilavesi, yüzeyde metal oksidasyonuna karşı bir bariyer görevi gören, ince ve yüzeye sıkıca tutunan bir Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filmi oluşturarak, dökme demirde grafit ayrışmasını önleme potansiyeline sahiptir [10].

Bu çalışmada, %3 Al ile alaşımlandırılmış sfero demirin aşınma davranışına östemperleme ısıl işleminin etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla hem Al içermeyen hem de %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirler kum kalıba döküm yöntemiyle üretilerek, üretim sonrası, 900 °C'de 90 dk süreyle östenit sahada tutulmuş, akabinde 300 °C'ye hızla soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 60 dk boyunca bekletilmiştir. Yapılan Al ile alaşımlama ve östemperleme işlemlerinin, dökme demirlerin aşınma özelliklerine etkisi, mikroyapının bir fonksiyonu olarak incelenmiştir.

## 2 Materyal ve metot

Pik demir, çelik hurdası ve elektrolitik bakırdan oluşan şarj malzemeleri, 100 kg kapasiteli bir indüksiyon ocağı kullanılarak hazırlanmış ve ergitilmiştir. Ergiyik 1540 °C'ye ısıtılmış ve ticari saflıkta Al parçaları bir piston yardımıyla potaya daldırılmıştır. Arzu edilen Al miktarı (ağırlıkça %3) spektrometre kullanılarak ayarlanmıştır. 1540 °C'deki işlemin ardından, modifiye edici olarak ağırlıkça %1,4 ferromangan (FeSiMg5) ve aşılavıcı olarak ağırlıkça %0,3 ferrosilikon (FeSi75) 1400 °C'de ergiye ilave edilmiştir. Gerekli bileşim elde edildiğinde ergiyik, Al içermeyen alaşım için 1380 ve %3 Al içeren alaşım için 1410 °C'de 135x240x10 mm boyutlarındaki yaş kum kalıplarına dökülmüştür. Artan Al ile ötektik dönüşüm sıcaklığı ve likidüs sıcaklığı arttığı için döküm sıcaklığı değişmiştir [11].

**Tablo 1**, döküm yoluyla üretilen külçelerin kimyasal bileşimini vermektedir.

Üretilen numunelerin bir kısmı karakterizasyon aşamasına geçerken diğer kısmı östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. 900 °C'de 90 dk süreyle östenit sahada tutulan numuneler, 300 °C'ye ısıtılmış sıcak yağ içerisine atılarak hızla soğutulmuş ve bu sıcaklıkta 60 dk boyunca bekletilmiştir. Üretim ve ısıl işlemler sonrası numunelerin parlatma ve dağlama sonrası mikroyapı görüntüleri, optik mikroskop (Nikon Eclipse MA100) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM, Carl Zeiss EVO LS 10) ile alınmıştır.

Mikroyapı karakterizasyonu sonrası sertlik ölçümleri Brinell test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerine 10 saniye boyunca 2,5 mm çapında tungsten karbür bir indentör vasıtasıyla 1839 N'luk bir yük uygulanmıştır. Her numune için rastgele beş ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalama değerleri verilmiştir.

Üretilen dökme demirlere ASTM G99-17 standardına uygun şekilde disk üzeri bilya tipi aşınma makinesi kullanılarak, kuru ortamda aşınma testleri yapılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında, bağıl nemin %40 olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Numuneler, 200 m mesafede 0,1 m/s kayma hızı ile 10 N yük altında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilya tarafından aşındırılmıştır. **Tablo 2**, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilyanın özelliklerini vermektedir. Çalışmada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilya, yüksek sertliği ve dayanım değerleri göz önünde bulundurularak, şiddetli aşınma koşullarını simüle etmek amacıyla kullanılmıştır. Aşınma oranları, her numune için aynı ortam koşullarında gerçekleştirilen üç ayrı testin ortalama sonucu olarak verilmiştir. Üretilen sfero dökme demirlerin aşınma oranları, hacim kaybının kayma mesafesine ve uygulanan yüke bölünmesiyle hesaplanmıştır. Hacim kayıpları, test öncesi ve sonrası ölçümlerle belirlenen kütle kayıplarının malzeme özkütlesine bölünmesiyle elde edilmiştir.

Aşınma çalışmalarında kullanılan cihaz, deney sırasında zamanın bir fonksiyonu olarak sürtünme katsayısı değerlerinin kaydını tutmuştur. Kayma mesafesi ile zaman eksenini değiştirilmiş ve kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değerlerindeki değişim verilmiştir. Aşınmış yüzey incelemeleri optik mikroskop ile yapılmış ve gözlemlenen aşınma mekanizmaları, sfero dökümlerin mikroyapısal gelişimi dikkate alınarak tartışılmıştır.

**Tablo 1.** Üretilen dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu (% ağırlıkça)

Al	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Fe
0.001	3.59	2.37	0.12	0.026	0.014	0.15	0.06	Kalan
2.99	3.65	2.31	0.11	0.027	0.014	0.16	0.06	Kalan

**Tablo 2.** Aşınma testlerinde karşıt yüzey olarak kullanılan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bilyanın karakteristik özellikleri

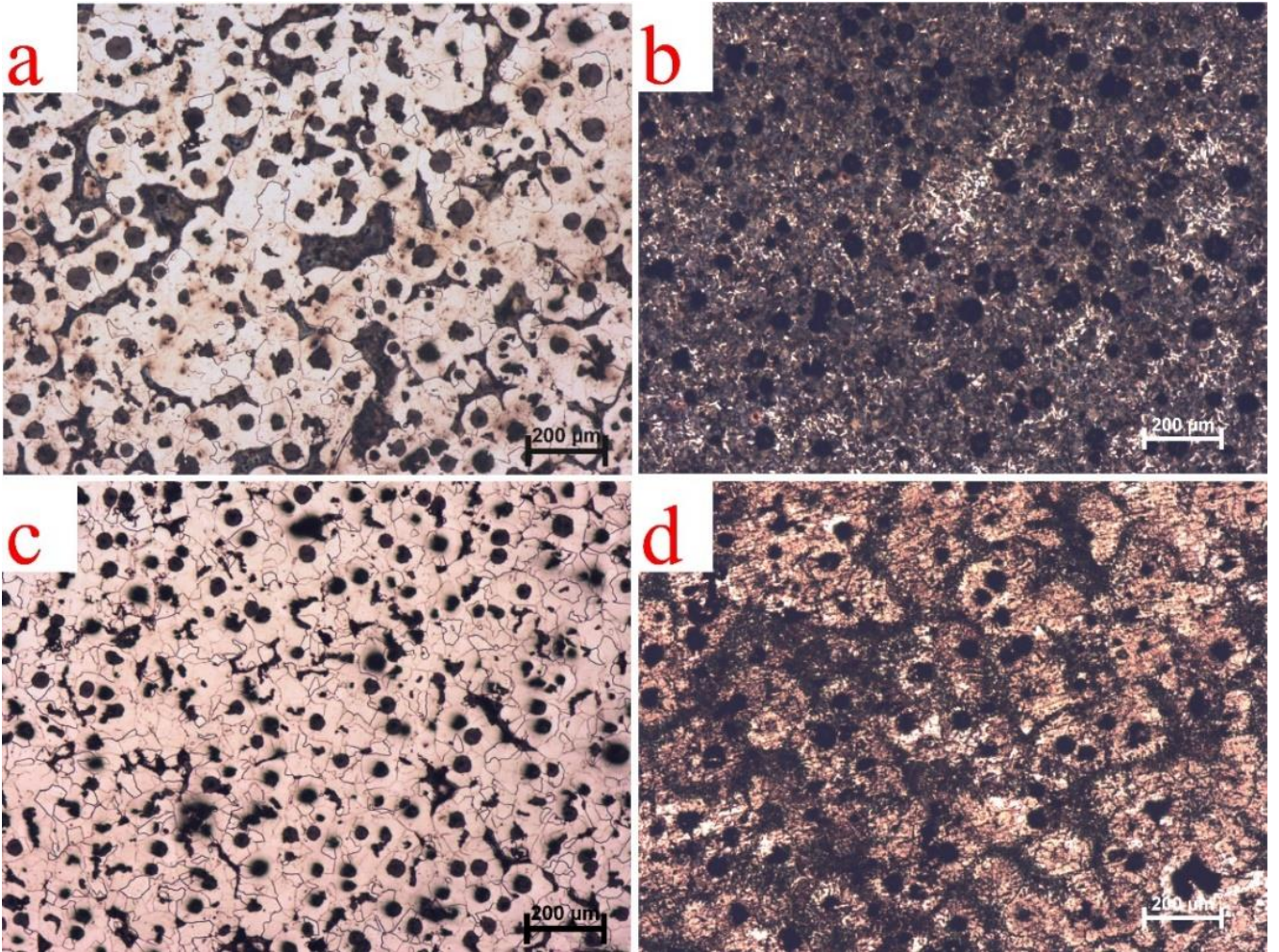
Özellik	Değer
Sertlik	1400 HV
Basma dayanımı	2600 MPa
Elastisite modülü	370 GPa
Yoğunluk	3.86 g/cm <sup>3</sup>
Çap	6 mm
Safılık	%99.5

### 3 Bulgular ve tartışma

Kum kalıba döküm yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilen %0 ve %3 oranında Al içeren sfero demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası mikroyapıları Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1a'da verilen Al içermeyen dökme demir numunede, beyaz bölgeler matristeki ferriti, koyu bölgeler ise perlitli göstermektedir. Çeşitli boyutlarda küresel veya kompakt grafitler de matrise gömülü şekilde göze çarpmaktadır. Şekil 1b'de aynı numunenin östemperleme sonrası mikroyapısı verilmiştir. Matristeki koyu bölgeler ısıl işlem sonrası oluşan beyniti işaret ederken, beyaz renkli bölgeler kalıntı östenit fazını belirtmektedir. Aynı yapıda küresel formdaki grafitlerin siyah renkte matrise gömülü şekilde bulunduğu görülebilmektedir. Östemperleme işleminde malzeme öncelikle östenit sahada 90 dk boyunca tutulduğu için yapının tamamı östenite dönüşmüştür. Ardından gerçekleştirilen 300 °C'ye ani soğutma işlemiyle östenitin beynite dönüşmesi sağlanmıştır. İşlem sonrası yapıda kalıntı östenit varlığı, bir kısım östenitin beynite dönüşmediğini göstermektedir.

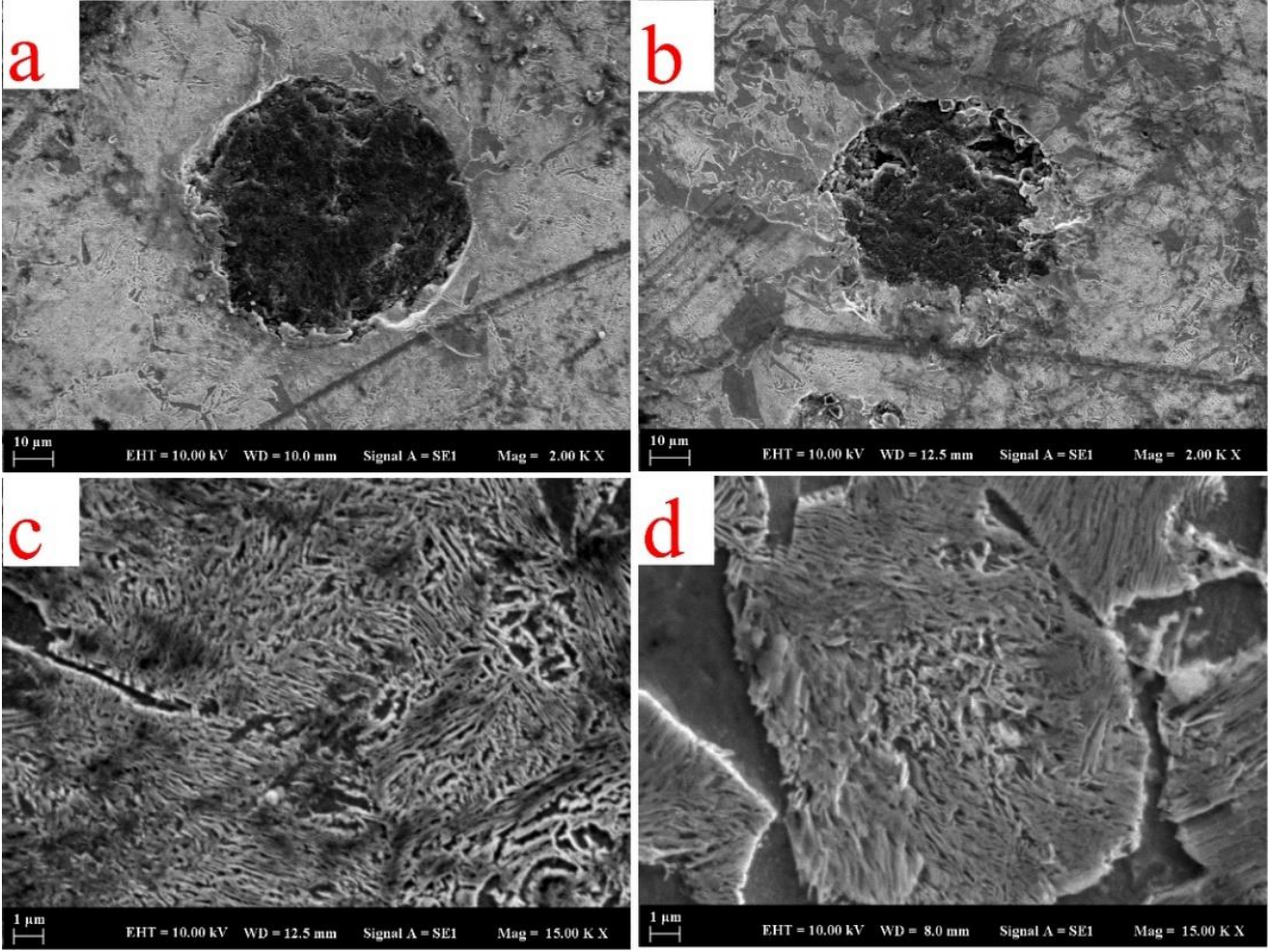
Şekil 1c'de %3 Al içeren sünek demir numunenin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Alaşimsız numuneye

kıyasla ferrit miktarının arttığı ve yapıda neredeyse hiç perlit kalmadığı görülmektedir. Bu, Al'nin Fe üzerindeki ferrit yapıcı etkisini doğrulayan bir bulgudur [12]. Aynı numunede, Al içermeyen numuneye kıyasla daha fazla grafit çekirlendiği belirlenmiştir. Al ilavesi, demir kafesi içinde karbon çözünürlüğünü düşürerek daha fazla karbonun yapıda serbest kalmasına neden olmaktadır [13]. Şekil 1d'de aynı numunenin östemperleme sonrası mikroyapısı verilmiştir. Yapının çoğunluğunun ferritten (açık renkli bölgeler) meydana geldiği, işlem sonrası önemli bir miktar beynitin (koyu bölgeler) oluştuğu ve bazı bölgelerde kalıntı östenite (adacıklar şeklindeki parlak bölgeler) rastlandığı belirlenmiştir. Östemperleme sıcaklığında bekleme sürecinde östenit yapı, ferrit/segmentit sınırlarında, ferrit/grafit sınırlarına göre daha kolay çekirdeklendiği ve Al katkılı dökme demirde neredeyse hiç segmentit oluşmadığı için, Al içermeyen numunenin östemperleme işlemi ideale daha yakın şekilde gerçekleşmiştir [6]. Al ilavesi, aynı zamanda dönüşüm sıcaklıklarını da düşürdüğü için, östenit sahadan beynit veya martenzit oluşumunu zorlaştırmaktadır. Bu nedenle östemperleme sonrası Al içermeyen numunede, %3 Al takviyeli numuneye göre yapıda daha fazla beynit oluşmuştur.



Şekil 1. (a, b) Al içermeyen ve (c, d) %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin (a, c) östemperleme öncesi ve (b, d) östemperleme sonrası mikroyapı görüntüleri





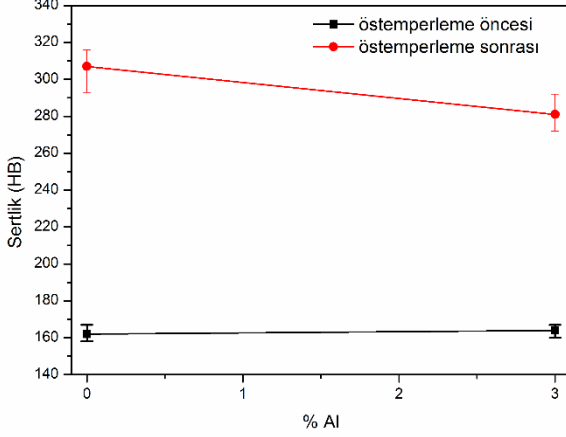
Şekil 2. (a, c) Al içermeyen ve (b, d) %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme işlemi sonrası elde edilen (a, b) düşük ve (c, d) yüksek büyütme SEM görüntüleri

Şekil 2’de Al içermeyen ve %3 oranında Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme sonrası düşük ve yüksek büyütme SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 2a ve 2b’de, optik mikroskop görüntülerinin aksine, açık renkli bölgeler beynit oluşumunu simgelerken, koyu bölgeler kalıntı östenit fazlarını işaret etmektedir. Al içermeyen numunede oluşan beynit miktarı daha fazlayken, %3 Al içeren sünek demirin daha fazla kalıntı östenit içerdiği belirlenmiştir. Aynı zamanda Al ilavesiyle birlikte, grafit küreselliğindeki bozulma da açık bir şekilde görülmektedir. Elde edilen bu sonuç, %2 ve üzerinde yapılan Al ilavelerinin dökme demirde vermiküler grafiti teşvik ettiğini belirten çalışmalarla uyumlu görünmektedir [14]. Matris bölgesine yakınlaştırılan yüksek büyütme SEM görüntülerinde (Şekil 2c ve 2d) oluşan beynitik ferrit yapısı açıkça ortaya konmuştur. %3 Al katkısıyla birlikte daha fazla kalıntı östenitin yapıda yer aldığı, diğer bir deyişle, östenitin beynite dönüşme kabiliyetinin azaldığı saptanmıştır. Bunun nedeni, Al ilavesinin, demir alaşımlarında martenzit ve beynit gibi hızlı soğuma fazlarının oluşumunu geciktirirken, ferrit oluşumunu kolaylaştırmasıdır. Yapıdaki Al miktarı arttıkça, TTT (zaman-sıcaklık-dönüşüm) diyagramlarındaki ferrit dönüşümünü belirten başlangıç ve bitiş eğrileri sola

kaymakta ve bunun sonucu olarak östenit sahadan beynit oluşumu zorlaşmaktadır.

Şekil 3, üretilen dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası ölçülen sertlik değerlerini vermektedir. Çoğunluğu ferrit olmakla birlikte, ferritik-perlitik matris üzerinde küresel grafit çökeltilerinden meydana gelen bir mikroyapıya sahip olan Al ile takviyelendirilmemiş numunenin sertliği 162 HB olarak ölçülmüştür. %3 Al ilavesi, malzemenin matrisini neredeyse tamamen ferritik bir yapıya dönüştürmüştür. Ferritik-perlitik bir matriste sertliği artıran faz, perlit içerisindeki sementit lamelleri olduğu için, %3 oranında Al ilavesinin malzemenin sertliğini düşürmesi beklenebilir. Ancak yapılan ölçümlerde, Al ile alaşımlandırılmış numunenin daha yüksek sertliğe sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Artan Al ile artan ferrit miktarı, Al’nin ferrit matrisinde çözünerek katı çözültü oluşturmasından ötürü sertlikte azalmaya neden olmamıştır. Fe-Al faz diyagramına göre, ferrit fazının ağırlıkça %11’in altında Al ile alaşımlanması, katı çözültü oluşturmaktadır [15]. Al atomları ferrit kafesine yayındığında, Al ve Fe’nin kafes parametreleri arasındaki büyük farklılıklar, matriste distorsiyona neden olmaktadır. Meydana gelen bu distorsiyon sayesinde, çekme dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerde artış meydana gelmektedir. Khalvan ve

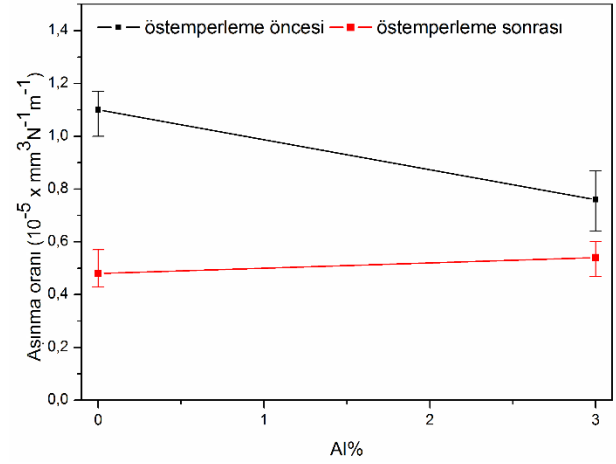
Divandari [16], yaptıkları çalışmada, Al miktarına bağlı olarak ferrit fazının sürekli artan sertliğini mikrosertlik cihazıyla ölçerek, bu çalışmada bahsedilen katı çözeltili sertleşmesinin doğruluğunu ispatlamışlardır.



**Şekil 3.** Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası ölçülen sertlik değerleri

Östemperleme sonrası yapılan ölçümlerde, ısıl işlem öncesi bulgulara göre farklı bir davranış gözlenmiştir. Al ile alaşımlandırılmamış numunenin sertliği 1.89 katına çıkarken, Al takviyeli dökme demirin sertliği 1.71 kat artmıştır. Bunun sonucunda alaşımlandırılmamış numunenin sertliği 307 HB olarak ölçülürken, %3 Al içeren numunenin sertliği 281 HB olarak bulunmuştur. Sertlikteki bu farklılık, Şekil 1'deki mikroyapısal değişikliklerle kolayca açıklanabilir. Görüldüğü gibi, alaşımlandırılmamış sünek demir, östemperleme işlemi sonrası çok daha fazla beynit içermektedir. Al ilavesiyle birlikte östenit sahadan ferrit oluşumu kolaylaşırken, bir östemperleme ürünü olan beynitin oluşma kabiliyeti zayıflamıştır. Bunun sonucunda da %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirde önemli ölçüde ferrit fazına rastlanırken, Al içermeyen numunede çoğunlukla beynit oluştuğu görülmüştür. Beynit, ferrite göre daha sert bir yapıda olduğu için Al içermeyen numunenin sertliği daha yüksek çıkmıştır.

Disk üzeri bilya tipi aşınma testleri sonrası malzemelerde meydana gelen aşınma kayıpları Şekil 4'te verilmiştir. En yüksek aşınma kaybı, alaşımlandırılmamış numunede meydana gelmiştir. Al ilavesi ile birlikte aşınma oranında yaşanan düşüş, katı çözeltili sertleşmesiyle matrisin güçlendirilmesine bağlanabilir. Perlit oranının azalmasıyla birlikte heterojenliğin azalması da aşınma dayanımını olumlu yönde etkileyen faktörlerden biri olarak sayılabilir. Östemperleme sonrası aşınma kayıpları alaşımsız numunede %56.36 oranında, %3 Al takviyeli numunede ise %28.95 oranında azalmıştır. Bu sonuçlara bakılarak, östemperleme işleminin, Al içermeyen numunede daha etkin sonuç verdiği çıkarımı yapılabilir. Şekil 3 ve Şekil 4'teki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, sertlik ile aşınma dayanımı arasında, literatürde de sıklıkla belirtildiği şekilde doğrusal bir ilişki olduğu açıkça görülmektedir [17,18].



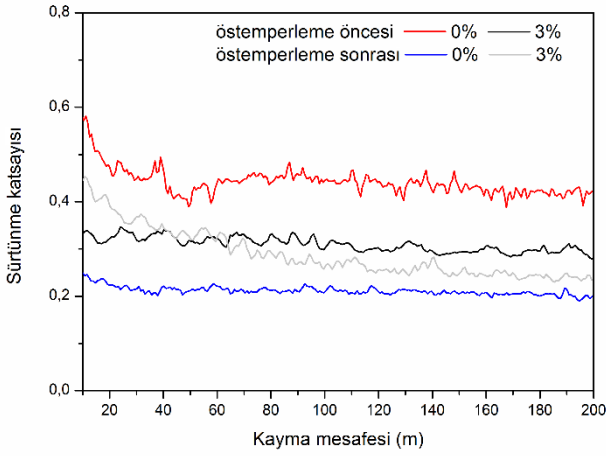
**Şekil 4.** Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası aşınma oranları

Aşınma testleri boyunca anlık olarak kaydedilen sürtünme katsayısı değerleri, kayma mesafesinin bir fonksiyonu olarak Şekil 5'te verilmiştir. Değerler incelendiğinde, Şekil 4'teki aşınma oranlarıyla uyumlu sonuçlar ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. En düşük aşınma dayanımına sahip numunede en yüksek sürtünme katsayısı değerleri (ortalama 0.45) elde edilirken, en iyi aşınma direncine sahip numunede en düşük sürtünme katsayısı değerlerine (ortalama 0.22) ulaşılmıştır. Numunelerin genel hatlarıyla kararlı durumlarına kayma testlerinin erken dönemlerinde ulaştıkları söylenebilir. Bunun en önemli nedeni tutma-bırakma etkisinin düşük olmasıdır. Kararlı durumuna en geç ulaşan malzeme, %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirin östemperleme işlemi görmüş halidir. Bu numunenin mikroyapısı tüm dökme demirler içerisindeki en kompleks yapıdır. Bu malzemenin matrisinde; dönüşmemiş kalıntı östenit, kafesinde önemli miktarda Al çözüldürmüş ferrit ve östemperleme sonrası oluşmuş beynit bulunmaktadır. Mevcut yapının heterojenliği nedeniyle bu numune, kararlı durumuna diğer numunelerin aksine, testin ancak ikinci yarısında ulaşabilmiştir.

Aşınma testleri sonrası dökme demirlerin aşınmış yüzeylerinin incelemesi optik mikroskop altında gerçekleştirilmiş olup aşınmış yüzey görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Aynı parametrelerle gerçekleştirilen kayma testleri sonrası, ilk bakışta yalnızca aşınma izi genişliklerine bakılarak bile hangi malzemenin aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğunun belirlenmesi mümkündür. Bu bağlamda, östemperleme öncesi Al ile alaşımlandırılmayan numunenin aynı yük altında aynı mesafede diğer numunelerden çok daha fazla aşındığı sonucuna varılabilir. %3 Al takviyesi ile birlikte aşınma izi genişliğinde önemli ölçüde bir daralma meydana gelmiştir. Östemperleme ile malzemeye kazandırılan sertlik sayesinde, bu numunelerdeki aşınma izi genişlikleri, östemperleme öncesi hallerine göre oldukça azalmıştır. Şekil 6c'de görülen çoğu beynitten ibaret matrisin Şekil 6d'de çoğu ferritten ibaret bir matrise dönüşmesiyle yaşanan sertlik kaybı nedeniyle,



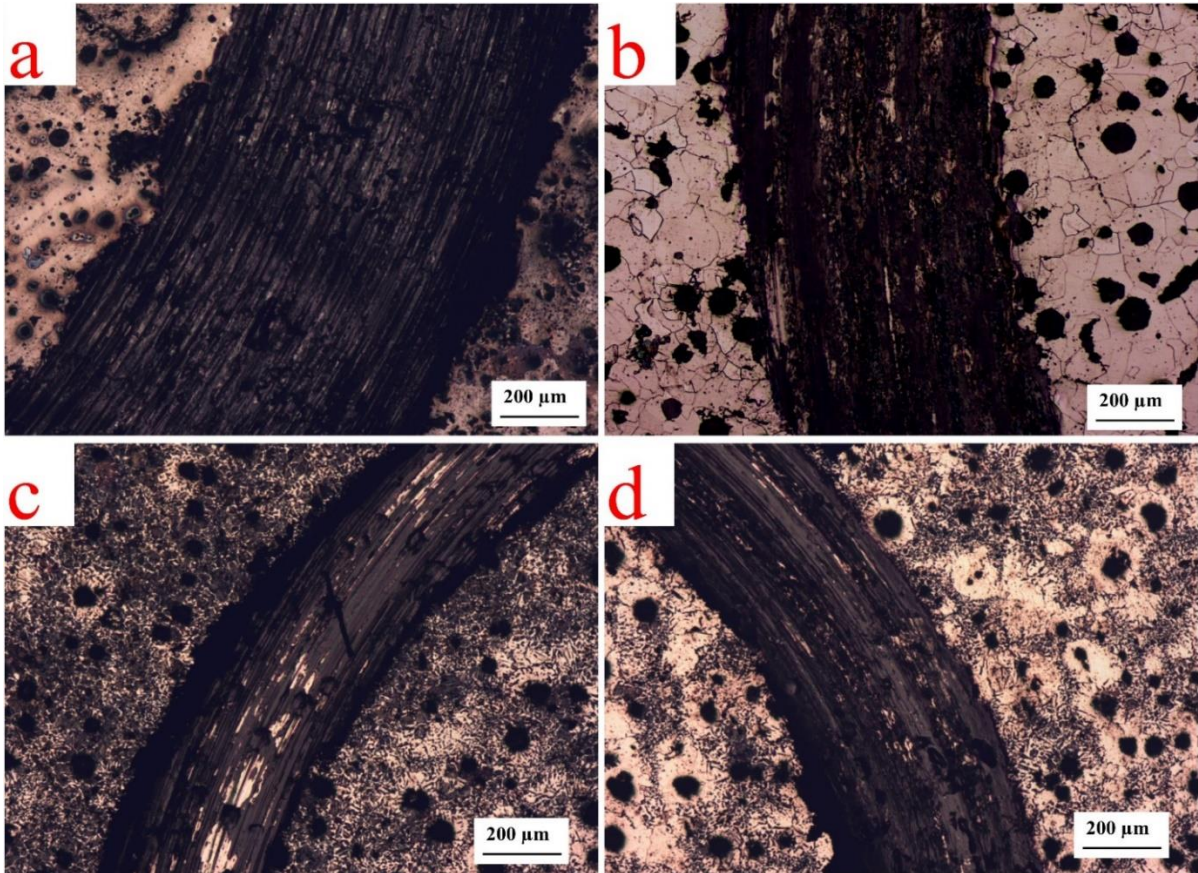
östemperlenmiş %3 Al içeren numunenin aşınma izi genişliği, Al içermeyene göre daha fazla bulunmuştur.



**Şekil 5.** Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin östemperleme öncesi ve sonrası kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı değerleri

Aynı görüntülerden malzemenin aşınma davranışının da belirlenmesi mümkündür. Belirgin olukların ve parçalanma bölgelerinin varlığı göz önüne alındığında, numunelerin

abrazif ve adhezif olarak aşındığı söylenebilir. Şekil 6a'daki numunede derin oluklar, bu olukların içinde başlayıp ilerleyen çatlaklar, kopan ve sıvanan metal parçacıklar ve çeşitli boyutlarda aşınma kalıntıları görülmektedir. Al ilavesi ile birlikte Şekil 6b'de oluşan olukların daha derin şekilde ortaya çıktığı, başka bir deyişle, abrazif aşınmanın arttığı söylenebilir. Buna karşılık, test sırasında kopan parçaların meydana getirdiği çukur ve tümseklerin azalması nedeniyle, adhezif aşınmanın azaldığı sonucuna varılabilir. Metalden ayrılarak bilya üzerine sıvanan parçalar, kayma sırasında ya burada kalmakta ya da malzeme yüzeyine tekrar yerleşmektedir. Kopan parçaların davranışına bağlı olarak, aşınmış yüzeylerde çukur veya tümsekler oluşmaktadır [19]. Perlitteki sementit mikroçatlak hasarına daha duyarlı olduğundan, Al ilavesi ile birlikte delaminasyon aşınması da azalmıştır [20]. Östemperleme sonrası aşınma izlerinde de benzer işaretlere rastlanmıştır. Özellikle beynit miktarı arttıkça oluk derinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, malzemenin beynit oluşumuyla artan sertliğinin, numune ile bilya temas yüzeyleri arasında kopan parçaların oluşturduğu aşınmaya karşı direnci artırmasıdır. Ayrıca, östemperleme sonrası aşınmış yüzey görüntülerinde, aşınma kalıntılarının sayısında ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Aşınma kalıntısı miktarı, delaminasyon aşınması ile doğrudan bağlantılı olduğundan, östemperlemenin delaminasyon aşınmasını azalttığı sonucuna varılabilir [21].



**Şekil 6.** (a, c) Al içermeyen ve (b, d) %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirlerin (a, b) östemperleme öncesi ve (c, d) östemperleme sonrası gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası elde edilen aşınmış yüzey görüntüleri

#### 4 Sonuçlar

Al içermeyen ve %3 Al içeren küresel grafitli dökme demirler başarıyla üretilmiş ve östemperleme işlemine tabi tutulmuştur. Bu çalışma sonucunda ortaya çıkan bulgular aşağıda verilmektedir.

%3 Al ilavesi, alaşımlandırılmamış dökme demirin ferritik-perlitik matrisini tamamen ferrite dönüştürürken, grafitlerin küreselliğinin de bozulmasına yol açmıştır. Östemperleme işlemi matrisin beynit ve kalıntı östenitten oluşmasına yol açarken, Al ile alaşımlandırmanın, oluşan beynit miktarını azalttığı belirlenmiştir.

Al içermeyen ve %3 Al içeren numunelerin östemperleme sonrası sertlikleri sırasıyla 1.89 ve 1.71 katına çıkmıştır.

%3 Al ile alaşımlama, dökme demirin aşınma dayanımını artırırken, östemperleme işlemi, alaşımsız numunenin aşınma dayanımında daha iyi sonuç vermiştir.

Aşınmış yüzey görüntülerinde, küresel grafitli dökme demirlerin abrazif ve adhezif baskın mekanizmaları altında aşındığı belirlenmiştir.

Üretilen sünek demire östemperleme ısıl işlemi uygulanmayacaksa, %3 oranında Al ile alaşımlama ile aşınma uygulamaları için daha dayanıklı bir malzeme üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Üretilen sünek demire östemperleme işlemi yapılarak mekanik özelliklerinde bir iyileştirme yapılacaksa, 300 °C'de 60 dk östemperlemenin iyi bir sonuç vermediği göz önüne alınmalıdır.

%3 Al ile alaşımlandırılmış küresel grafitli dökme demir numune aynı zamanda katı çözeltili sertleşmesi de gösterdiğinden, uygun bir sıcaklık ve sürede östemperleme yapıldığı takdirde, alaşımsız numuneden çok daha yüksek bir aşınma direnci göstereceği düşünülmektedir.

#### Teşekkür

Yazar, dökme demirlerin tedariki sürecindeki yardımlarından ötürü, Yük. Müh. Açelya Sandıkoğlu'na teşekkür eder.

#### Çıkar çatışması

Yazar, çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %11

#### Kaynaklar

- [1] K. A. Kasvayee, E. Ghassemali, I. L. Svensson, J. Olofsson ve A. E. W. Jarfors, Characterization and modeling of the mechanical behavior of high silicon ductile iron. *Materials Science and Engineering A*, 708, 159–170, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.115>
- [2] A. Vicente, J. R. Sartori Moreno, T. F. Santos, D. C. R. Espinosa ve J. A. S. Tenório, Nucleation and growth of graphite particles in ductile cast iron. *Journal of Alloys and Compounds*, 775, 1230–1234, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.136>
- [3] K. Odum ve M. Soshi, Surface Formation Study Using a 3-D Explicit Finite Element Model of Machining of

- Gray Cast Iron. *Procedia CIRP*, 45, 111–114, 2016. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.02.168>.
- [4] A. O. Adebayo, O. O. Ajibola, A. F. Owa, S. G. Borisade, K. K. Alaneme ve A. Oyetunji, Characterisation and dry sliding wear behaviour of 2.29 aluminium-alloyed ductile iron. *Materials Today: Proceedings*, 38, 1152-1158, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.138>.
- [5] A. R. Kiani-Rashid ve D. V. Edmonds, Microstructural characteristics of Al-alloyed austempered ductile irons. *Journal of Alloys and Compounds*, 477, 391-398, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.10.038>.
- [6] A. R. Kiani-Rashid, Influence of austenitising conditions and aluminium content on microstructure and properties of ductile irons. *Journal of Alloys and Compounds*, 470, 323-327, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.02.070>
- [7] C. Labrecque ve M. Gagné, Ductile Iron: Fifty years of continuous development. *Can Metall Q*, 37, 343–378, 1998. <https://doi.org/10.1179/cmq.1998.37.5.343>.
- [8] M. S. Sołński, P. Kordas, K. Skurka ve A. Jakubus, Investigations of Ferritic Nodular Cast Iron Containing about 5-6% Aluminium. *Arch Foundry Eng*, 16, 141-146, 2016. <https://doi.org/10.1515/afe-2016-0099>.
- [9] A. O. Adebayo, K. K. Alaneme ve A. Oyetunji, Corrosion Evaluation Of Austempered Aluminium-Alloyed Ductile Irons In Well Water And 0.5M NaCl Solution. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 56, 180-193, 2021.
- [10] A. R. K. Rashid ve D. V. Edmonds, Oxidation behaviour of Al-alloyed ductile cast irons at elevated temperature. *Surface and Interface Analysis*, 36, 1011-1013, 2004. <https://doi.org/10.1002/sia.1825>
- [11] E. Aguado, M. Ferrer, P. Larrañaga, D. M. Stefanescu ve R. Suárez, The Effect of the Substitution of Silicon by Aluminum on the Properties of Lamellar Graphite Iron. *International Journal of Metalcasting*, 13, 536-545, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-00303-y>.
- [12] D. Franzen, P. Weiß, B. Pustal ve A. Bührig-Polaczek. Modification of Silicon Microsegregation in Solid-Solution-Strengthened Ductile Iron by Alloying with Aluminum. *International Journal of Metalcasting*, 14, 1105-1114, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00412-7>
- [13] H. R. Erfanian-Naziftoosi, N. Haghdadi ve A. R. Kiani-Rashid, The effect of isothermal heat treatment time on the microstructure and properties of 2.11% Al austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1785-1792, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-0086-y>.
- [14] A. S. Benam, Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process: Review. *China Foundry*, 12, 54–70, 2015.
- [15] U. R. Kattner ve B. P. Burton, Phase diagrams of binary iron alloys. ASM International, Chicago, 1993.
- [16] M. M. Khalvan ve M. Divandari, Microstructure of spheroidal graphite aluminum-alloyed cast irons

- (SGAACI) containing up to 7.5 wt% produced via in-mold process. *International Journal of Metalcasting*, 15, 271–280, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00461-y>.
- [17] J. D. Lemm, A. R. Warmuth, S. R. Pearson ve P. H. Shipway, The influence of surface hardness on the fretting wear of steel pairs-Its role in debris retention in the contact. *Tribology International*, 81, 258-266, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.003>.
- [18] J. Li, Y. Lu, H. Zhang ve L. Xin, Effect of grain size and hardness on fretting wear behavior of Inconel 600 alloys. *Tribology International*, 81, 215-222, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.08.005>.
- [19] G. K. Goh, L. Lim, M. Rahman ve S. Lim, Effect of grain size on wear behaviour of alumina cutting tools. *Wear*, 206, 24-32, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00002-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00002-1)
- [20] A. K. Jha, B. K. Prasad, O. P. Modi, S. Das ve A. H. Yegneswaran, Correlating microstructural features and mechanical properties with abrasion resistance of a high strength low alloy steel. *Wear*, 54, 120-128, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00309-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00309-5)
- [21] A. M. Kirk, P. H. Shipway, W. Sun ve C. J. Bennett, Debris development in fretting contacts – Debris particles and debris beds. *Tribology International*, 149, 105592, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.051>







## Farklı barit cevherlerinin konvansiyonel değirmenlerde bazı öğütme özelliklerinin belirlenmesi

### Determination of the some grinding properties of different barite ores by conventional mills

Güler Bayar<sup>1,\*</sup> , Meftuni Yekeler<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

#### Öz

Farklı kompozisyonlardaki barit cevheri numuneleri konvansiyonel değirmenlerle kuru öğütülerek tane boyut dağılımları elde edilmiştir. Safa yakın ve gang içeren numuneler bilyalı ve çubuklu ortamlarda öğütülerek elde edilen ürünler farklılıklar göstermiştir. Dört farklı barit cevheri öğütme testlerine tabi tutulmuş olup, yüksek BaSO<sub>4</sub> tenörlü B1 ve B2 numuneleri, bilyalı değirmende 8 dakika, çubuklu değirmende 3 dakika öğütülmeye -212 µm tane boyut fraksiyonunu vermiştir. Diğer taraftan, düşük BaSO<sub>4</sub> tenörlü B3 ve B4 gibi gang içerikli (çoğunlukla kuvars içeren) barit cevher numuneleri ise bilyalı değirmende 16 dakika, çubuklu değirmende 6 dakika öğütülmeye -212 µm tane boyut fraksiyonunu vermiştir. Değirmenlerde yavaşlama etkisi olayına sebep olan ince tanelerin artması, safa yakın barit numunelerinde (B1 ve B2) daha kısa öğütme sürelerinde rastlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Barit, Öğütme, Bilyalı değirmen, Çubuklu değirmen, Yavaşlama etkisi

#### 1 Giriş

Barit, baryum elementinin en yaygın minerali olan baryum sülfatı (BaSO<sub>4</sub>). Metalik olmayan minerallerin en ağır olan barit, yüksek yoğunluğa (4.45-4.5 gr/cm<sup>3</sup>) sahiptir [1]. Aynı zamanda, X ışınlarına karşı opaklığı, inertliği ve beyazlığı nedeniyle yaygın olarak kullanılan önemli bir inorganik kimyasal üründür [2]. Az aşındırıcı olması (Moh's 3-3.5), yüksek ısı ve basınç altında kimyasal sabitliğini koruması, su ve asitlerde düşük çözünürlüğü önemli avantajları arasındadır. Manyetik özelliğinin olmaması ve uygun maliyetlerde temini onun çeşitli endüstrilerde de giderek yaygın şekilde kullanımını sağlamıştır [3].

Endüstriyel minerallerden, önemli olan barit minerali, kullanıldığı sektörde bazında ele alındığında en yüksek pazar payını sondaj çamurunda kullanımı ile almaktadır. Bu nedenle, ince öğütülmesinin kaçınılmaz olduğu bilinmektedir. Sektörel anlamda en yüksek pazar payı, sondaj çamuru olmasına karşın küçük ölçekli olarak, kimyasal, cam, kauçuk, boya vb. gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmaktadır [4]. Bu pazar, dolgu malzemesi, kimyasallar ve seramikler olarak üç ana uygulamadan

#### Abstract

The particle size distributions of the different barite ore samples were obtained by dry grinding in the conventional mills. The ball media and rod media produced different products for nearly pure barite and the gang associated barite samples. Four different barite samples were subjected to grinding tests. The -212 µm size fraction was obtained for high BaSO<sub>4</sub> grade barite samples of B1 and B2 at 8 minutes from the ball media and 3 minutes from the rod media employed. On the other hand, the same size fraction was obtained for the low BaSO<sub>4</sub> grade samples that contained gang minerals (mostly quartz) of B3 and B4 at 16 minutes for the ball media and at 6 minutes for the rod media. The slowing down effect which is caused by fine particles accumulation in the mills was reached at shorter grinding times for the high grade barite samples of B1 and B2

**Keywords:** Barite, Grinding, Ball mill, Rod mill, Slowing down effect.

oluşmaktadır. Barit endüstrisinin bu yönlerinin derinlemesine incelemeleri, [5-8] tarafından yapılmıştır.

Brobst [6] tarafından barit cevherlerinde gang mineralleri olarak yer alan başlıca safsızlıklar olarak, kuvars, kalsit, siderit, selestit, fluorit, çört, demirli kil ve çeşitli sülfür mineralleri (pirit, kalkopirit, galen, sfalerit vb.) olduğu belirtilmiştir.

Cevher içerisinde bulunan safsızlıklara göre farklı fiziksel özellik göstermektedir. Kütlece yüzde safsızlık değerine göre Mohs sertliği, saydamlığı gibi özellikleri saf cevhere göre farklılık gösterebilmektedir. Baritin çoğu öğütülerek, sanayi ürünlerinde katkı malzemesi, petrol veya doğalgaz kuyularını açarken ağırlık yapması için kullanılır. MTA'nın 2017 verilerine göre, Türkiye'deki barit rezervi görünür + muhtemel olarak 34.222.792 tondur [9]. Ülkemizin sahip olduğu bu önemli barit rezervi genellikle sondaj çukuru açma işlemlerinde kullanılmakta, yüksek katma değere sahip ürünlere dönüştürülmeden ihraç edilmektedir. Bu durum, öğütme işlemlerini, barit cevherleri için daha da önemli hale getirmektedir.

Öğütme bir maden işletmesinin, maliyetlerinin yaklaşık % 30-50'sini oluşturmaktadır [10-11]. Öğütme işlemlerinde

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gbayar @ cumhuriyet.edu.tr (G. Bayar)

Geliş / Recieved: 30.09.2021 Kabul / Accepted: 18.03.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1001793



enerji ihtiyacı yüksektir. Minerallerin öğütülmesinde çok sayıda değirmen imalatçısı ve birkaç farklı değirmen tipi bulunmaktadır. Ama tüm bu alternatifler arasında doğru seçim yapmak ciddi bir sorundur [12]. İnce öğütme büyük miktarda enerji tükettiğinden ve yüksek aşınmaya neden olabileceğinden, güncel araştırmaların çoğu bu bilimsel ve teknik sorunlara odaklanmıştır [13].

İnce öğütmede en yaygın kullanılan değirmen tipi konvansiyonel bilyalı değirmenlerdir. Ancak, bilyalı değirmende kullanılan en küçük bilya boyutu 25 mm olmasından dolayı, değirmen içindeki çarpma hareketlerinden öğütülen cevhere aktarılacak enerji, küçük boyutlarda küçültme için yeterli olmamaktadır. Küçük partiküllerin ufalanmasında basınç ve kesme kuvvetleri gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmende öğütme iri boyutta kalmaktadır. Bilyalı değirmenin ekonomik öğütme sınırları 100 µm'ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenin spesifik enerjileri üstel olarak artış göstermektedir [14]. Bilyalı değirmende öğütme, bilyaların cevher partikülleri ile noktasal teması sonucunda gerçekleşmektedir. Yeterli süre verilmesi durumunda bu değirmenler ile istenilen incelikte ürün alınabilmektedir. Bu yüzden bilyalı değirmen ile 50 mikronun altına öğütme yapmak mümkündür. Çubuklu değirmene göre daha ince ürün veren bu değirmende boyun çapa oranı 1 ile 1.5 arasında değişmektedir. Genel olarak ince öğütmelerde değirmenin boyu daha uzundur. Çubuklu değirmende, malzeme çubukların arasında bir hat boyunca öğütüldükleri için daha homojen ürünler elde edilirken, çubuklar arası boşluklar diğer konvansiyonel değirmen tiplerine göre daha az olduğundan öğütme verimi daha yüksek olmaktadır [15].

Kuru öğütme uygulamaları kimya endüstrisi, mineral endüstrisi ve çimento üretimi için oldukça önemlidir. Ayrıca öğütme işlemlerinde değirmende çoğalan ince partiküllerin artması nedeniyle, öğütme zorlaşmakta ve hatta durmaktadır [16]. Değirmen içerisindeki kırılma davranışı cevherlerde belirli bir sürenin sonunda doğrusallıktan uzaklaşarak sapma göstermektedir. Bu duruma kırılma yapıda olmayan çimento klinkerlerinin birkaç saat öğütüldükten sonra daha fazla boyut küçültmenin sağlanmadığı örnek olarak gösterilebilir. Bazı araştırmacılar [17], bu durumu yavaşlama etkisi (slowing down effect) teorisi ile açıklamışlardır. Bu durum, öğütme süresinin artışı ile ortamda ince partiküllerin artması ve bunların yastıklama etkisi oluşturmasıyla açıklanabilir. Yastıklama etkisi, ince partiküllerin iri partiküllerin etrafını sarması ve öğütmeyi olumsuz yönde etkilemiş olmasıdır. Bu olumsuzluk nedeniyle birinci dereceden doğrusal kırılma davranışından uzaklaşmakta, kırılma hızı azalmaktadır. Dolayısıyla da öğütme için harcanan enerji sarfiyatı ne kadar devam ederse etsin, öğütücü ortamda öğütmenin yavaşladığı ve hatta daha ileriki sürelerde durduğu öngörülmektedir. Bilyalı ve çubuklu değirmende yavaşlama etkisinin, istenen partikül boyutunu elde etmek ve enerjinin verimli kullanılması için ne zaman başladığı oldukça önemlidir.

Yapılan bir çalışmada barit mineralinin, 2 dakikalık öğütme işleminden sonra yavaşlama etkisi gösterdiğini belirtmiştir. Kullandıkları barit numunelerinin kimyasal

kompozisyonlarının, bu çalışmada kullanılan B1 ve B2 numunelerine benzer olduğu ve yavaşlama etkisinin de, benzer özellikler gösterdiği görülmektedir [18].

Özkan vd.'nin [19] yaptıkları bir çalışmada barit numunelerinin seramik bilyalı öğütücülerde kuru öğütülmesi sonucu yavaşlama etkisinin 4 dakika sonra başladığını göstermiştir.

Bu çalışmada, mineral endüstrisinde boyut küçültmede yaygın olarak kullanılan bilyalı ve çubuklu değirmenlerde farklı BaSO<sub>4</sub> tenörlerindeki barit cevherlerinin öğütülmesi sonucu hedeflenen (-212µm) partikül boyut dağılımının öğütme sürelerine bağlı olarak değişimini belirlemek ve ince öğütmede verimsizliğe neden olan yavaşlama etkisinin belirlenmesini amaçlamaktadır.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Materyal

Çalışmalarımızda kullanılan barit cevherleri Sivas yöresinden temin edilmiştir. Ocağın farklı bölgelerinden alınan dört ayrı barit numunesi farklı kimyasal bileşene ve farklı tenörlere sahiptir. Bilyalı ve çubuklu değirmenle yapılan öğütme testlerinde kullanılan barit cevherlerinin (B1, B2, B3 ve B4) kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneylede kullanılan barit cevherlerinin kimyasal kompozisyonları

Mineral Adı	Bileşen	Ağırlık Oranı (%)
B1	BaSO <sub>4</sub>	95.52
	SiO <sub>2</sub>	0.021
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35
	Özgül Ağırlık	4.37 g/ml
B2	BaSO <sub>4</sub>	79.82
	SiO <sub>2</sub>	5.12
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.41
	Özgül Ağırlık	3.98 g/ml
B3	BaSO <sub>4</sub>	59.72
	SiO <sub>2</sub>	34.91
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.23
	Özgül Ağırlık	3.57 g/ml
B4	BaSO <sub>4</sub>	58.36
	SiO <sub>2</sub>	36.81
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.93
	Özgül Ağırlık	3.54 g/ml

Öğütme işlemleri bilyalı ve çubuklu değirmende, farklı sürelerde yapılmış, elde edilen ürünler, 600 µm, 425 µm, 300 µm, 212 µm, 150 µm, 106 µm, 75 µm, 53 µm, 38 µm boyutları içeren elek setinden yaş olarak elenerek partikül boyut dağılımları elde edilmiştir. Eleme süresi, yapılan eleme kinetiği çalışmaları ile 10 dk olarak belirlenmiş ve tüm eleme işlemlerinde bu eleme süresi kullanılmıştır.

### 2.2 Metod

Öğütme, öğütücü ortam, değirmen çepri ve malzeme arasındaki temasın bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle, öğütücü ortamında, öğütücü ortam ve değirmen

çeperi, öğütücü ortam ve partiküller, partiküller ve değirmen çeperi arasında ve birden çok partikül arasında çarpışmalar meydana gelebilir [20]. Öğütme işlemi, partiküllerle öğütücü ortam (çubuk, bilya veya çakıl) arasındaki göreceli hareket ile oluşmaktadır. Bu hareket, öncelikle çarpma sonucu oluşan kırılma veya birincil olarak ezilme ve aşındırmanın neden olduğu kırılma olarak karakterize edilebilir [21].

Bu çalışmada, ocaktan gelen tüvenan cevher, çeneli kırıcıda -2.5 cm'ye kırılmış ve öğütme testleri de bu boyut fraksiyonu ile yapılmıştır.

Cevher numunelerinin öğütme testleri, bilyalı ve çubuklu değirmende ve öğütme koşulları, Tablo 2'de verilen şartlarda yapılmıştır. Öğütme deneylerinin tamamı kuru yapılmıştır.

Ocaktan gelen ve farklı kompozisyonlara sahip olan numuneler, bilyalı ve çubuklu değirmende farklı sürelerde öğütülerek, hem ince boyutta malzemelerin (-212µm) elde edilmesi için gerekli öğütme süreleri hem de öğütmede yavaşlama etkisi belirlenmiştir. Bilyalı değirmende, numuneler sırasıyla 1, 2, 4, 8, 16, 32 dakika öğütülerek hedeflenen partikül boyutu için gerekli öğütme süresi bulunmuştur. Çubuklu değirmende öğütmenin daha hızlı olduğu gözlemlendiğinden, B1 ve B2 için öğütme süreleri 1, 2, 3, 4 ve 7 dakika, B3 ve B4 için 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 dakikalık sürelerle öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütme işlemlerine ait partikül boyut dağılımları Şekil 1-8'de verilmiştir.

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 B1 numunesinin öğütme testleri

BaSO<sub>4</sub> içeriği en yüksek olan (% 95.52) B1 numunesinin bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme

deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 1 ve 2'de verilmiştir.

Numuneler için öğütme sonucunda ürünlerin 212 µm tane boyutundan en az %80'inin geçtiği öğütme süresi istenilen öğütme süresi olarak kabul edilmiştir.

B1 numunesinin özellikle çubuklu değirmende öğütülmesi testlerinde, 3 dakikalık öğütme süreleri sonunda elde edilen partiküllerin boyut fraksiyonları, beslenenin boyut fraksiyonuna kıyasla oldukça ince ürün vermiştir. Bu nedenle öğütme daha kısa aralıklarla ve bilyalı değirmene göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak, B1 numunesinin öğütme sonuçları değerlendirildiğinde; bilyalı değirmende 8 dakika öğütme ile malzemenin % 81.31'inin, çubuklu değirmende ise 3 dakika öğütme ile malzemenin %94.33'ünün 212 µm'nin altına geçtiği belirlenmiştir.

#### 3.2 B2 numunesinin öğütme testleri

Bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 3 ve 4'de verilmiştir.

B2 numunesi kimyasal kompozisyon ve tenör bakımından B1 baritleriyle yakın özellikler gösterdiğinden öğütme işlemlerinde de benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Yapılan bir çalışmada, % 98 içerikli ve kuvarstan oluşan barit örneklerinde baritin kolay kırıldığı belirtilmektedir[22].

B2 numunesinin, bilyalı değirmende 3 dakika öğütme ile malzemenin % 86.02'sinin, çubuklu değirmende ise 3 dakika öğütme ile malzemenin %87.96'sının 212 µm'nin altına geçtiği görülmüş olup B1 numunesi ile çok yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

**Tablo 2.** Bilyalı ve çubuklu değirmen özellikleri ve deney koşulları

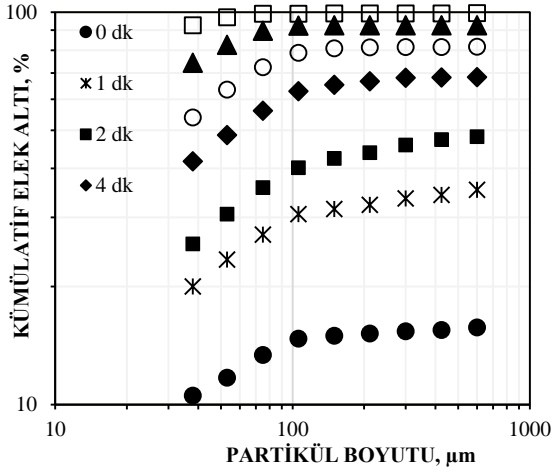
	Parametreler	Bilyalı Değirmen	Çubuklu Değirmen
Değirmen	İç çapı (D), mm	198	214
	Uzunluğu (L), mm	200	300
	Hacmi (V), cm <sup>3</sup>	6155	9046,97
	Kritik Hız,(N <sub>c</sub> ), d/d	103 <sup>a</sup>	95.55 <sup>a</sup>
	Çalışma Hızı (N), d/d	77	59.71
Ortam	Malzemesi	Çelik alaşım	Çelik alaşım
	Ortalama bilya çapı (d), mm	31	19.81(9adet); 24.71(4adet); 29.84(3adet)
	Sayısı, adet	45	16
	Özgül ağırlık, gr/ cm <sup>3</sup>	7.8	7.8
	Toplam bilya şarjı, g	5761	16848
	Bilya şarjı, J	0.2 <sup>b</sup>	0.3 <sup>b</sup>
	Mineral (Barit)	Besleme miktarı, g	642.60
Dolum oranı, f <sub>c</sub>		0.04 <sup>c</sup>	0.04 <sup>c</sup>
Malzeme bilya doluluk oranı, U		0.5 <sup>d</sup>	0.5 <sup>d</sup>
$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D-d}} \cdot \frac{d}{d}, \quad J = \frac{\text{Bilya Ağırlığı/Bilya Yoğunluğu}}{\text{Değirmen Hacmi}} * \left(\frac{1.0}{0.6}\right), \quad f_c = \frac{\text{Mineral Şarj Miktarı/Mineral Yoğunluğu}}{\text{Değirmen Hacmi}} * \left(\frac{1.0}{0.6}\right), \quad U = \frac{f_c}{0.4 * J}$			

### 3.3 B3 numunesinin öğütme testleri

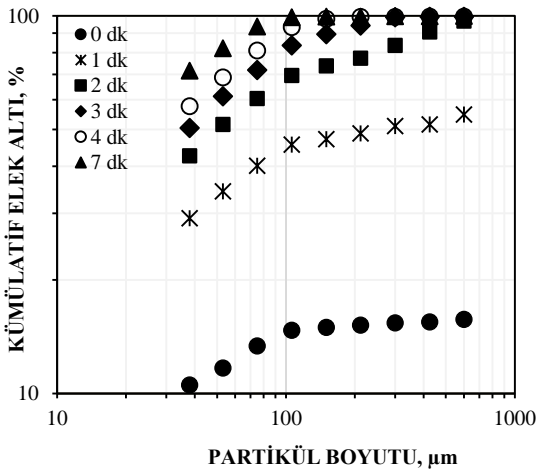
Bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.

B3 numunesinde, bilyalı değirmende 16 dakika öğütme ile malzemenin % 79.93'ü (~%80), çubuklu değirmende ise 6 dakika öğütme ile malzemenin %83.17'si 212 µm'nin altına geçmiştir. Bu durum, barit numunelerinin içerisindeki safsızlıklardan olan kuvars mineral içeriğinin artmasıyla malzemenin daha zor kırıldığını göstermektedir.

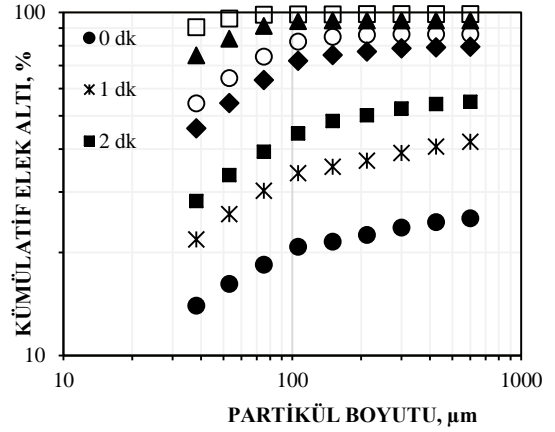
Yekeler vd. [23], yaptıkları bir çalışmada barit mineralini, diğer endüstriyel minerallerden olan kuvars minerali ile karşılaştırmış ve baritin kuvarsa göre daha çabuk öğütülebilir olduğunu göstermiştir. Barit için elde edilen özgül kırılma hızı ( $S_i$ ) değeri -850+600µm için  $0.99 \text{ dk}^{-1}$  iken, kuvars için bu değer  $0.51 \text{ dk}^{-1}$  olarak belirlenmiş ve baritin daha çabuk ve kırılabilir bir yapıya sahip olduğu vurgulanmıştır.



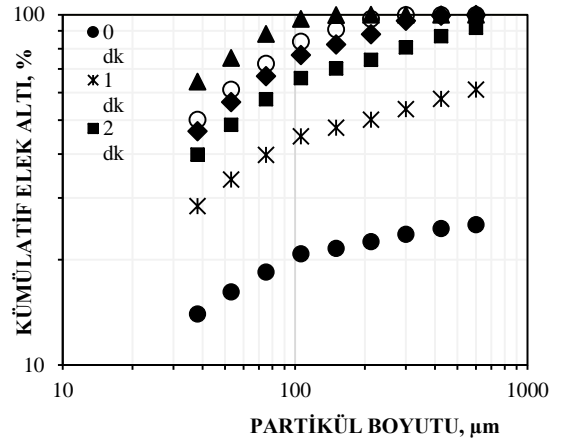
Şekil 1. Bilyalı değirmende öğütülmüş B1 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



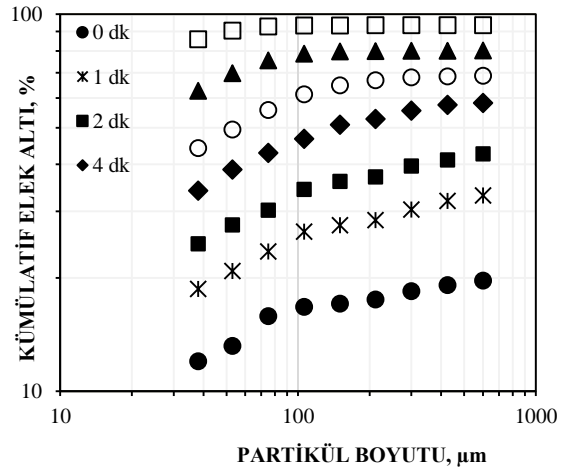
Şekil 2. Çubuklu değirmende öğütülmüş B1 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



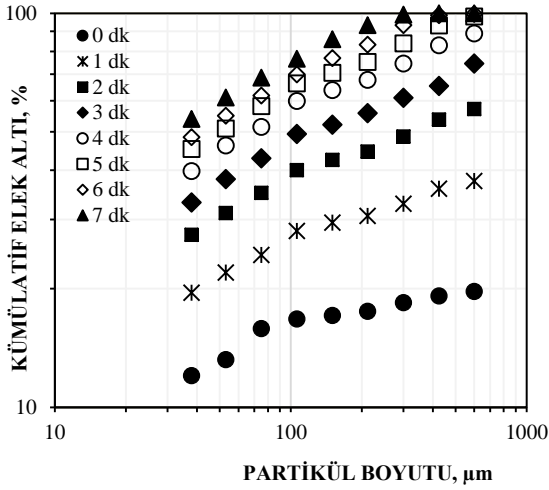
Şekil 3. Bilyalı değirmende öğütülmüş B2 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 4. Çubuklu değirmende öğütülmüş B2 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 5. Bilyalı değirmende öğütülmüş B3 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 6. Çubuklu değirmende öğütülmüş B3 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları

### 3.4 B4 numunesinin öğütme testleri

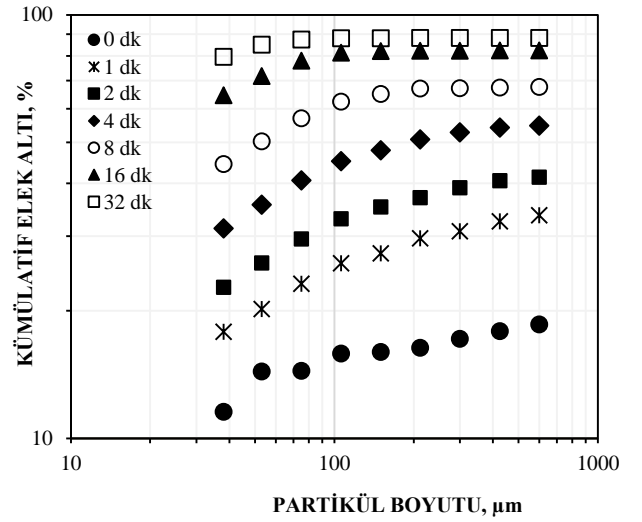
B4 cevheri, çalışılan tüm numunelere kıyasla SiO<sub>2</sub> içeriği (% 36.81) en yüksek olanıdır. Bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 7 ve 8’de verilmiştir.

B4 numunesinde ise, bilyalı değirmende 16 dakika öğütme ile malzemenin %82.19 ‘u, çubuklu değirmende ise 6 dakika öğütme ile malzemenin %80.66’sı 212 µm’nin altına geçmiştir. Bu süreler B3 numunesiyle aynı olmasına karşın, B3 numunelerine kıyasla elde edilen % elek altı (ince partiküller) miktarları daha düşüktür. Yapılan bilyalı ve çubuklu değirmen ile öğütme testlerinin tümüne bakıldığında, aynı sürelerde, ince partikül eldesi, B4 numunelerinde, diğer tüm numunelere kıyasla daha azdır.

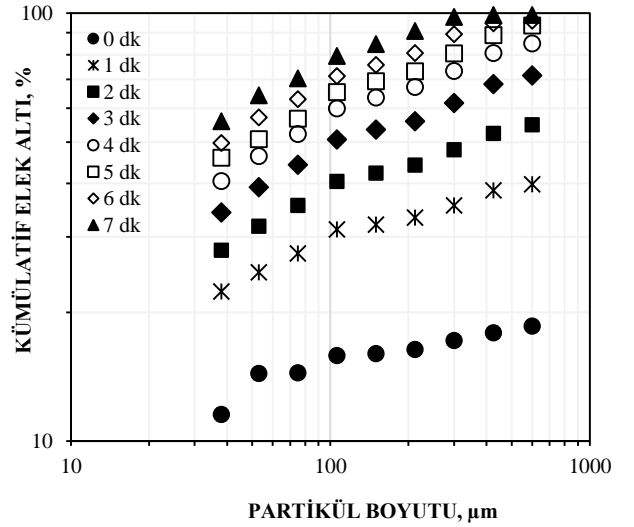
Bilyalı değirmende öğütme süresinin çubuklu değirmene göre uzun olmasının nedenleri öğütme mekanizmalarına bağlı olarak açıklanabilir. Çubuklar arasındaki boşlukların bilyalar arasındaki boşluklardan daha az olması, öğütme süresini kısaltmakta olup birim enerji sarfiyatını da azaltmaktadır. Değirmen ortam ve koşullarıyla beraber, öğütülen malzemenin de kırılma özellikleri etkin olmaktadır. Bu parametreler doğrultusunda cevherin kısa sürede ya da daha uzun sürede öğütülebilirliğini, birinci derece kırılma kinetiğine uyup uymadığını tayin etmektedir.

B1 ve B2 numunelerinde gang yapıcı mineral içeriğinin daha az barit tenörünün (BaSO<sub>4</sub>) daha yüksek olmasına ilaveten baritin de kırılma yapısında olması nedeniyle istenen partikül boyut dağılımına ulaşmak için asgari öğütme süreleri, gang yapıcı mineral içeriği yüksek olan diğer numunelere göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

1.3 mm’nin üzerindeki besleme boyutları için, özgül kırılma oranı kuvars için, çubuklu değirmende bilyalı değirmenden daha yüksek, ancak bu boyutun altında özgül kırılma oranı daha düşük olduğu bildirilmiştir [24]. -38µm boyutlu farklı kompozisyonlardaki barit numuneleri için kıyaslama yapıldığında bu durum yapılan deneysel çalışmalarla da görülmüştür



Şekil 7. Bilyalı değirmende öğütülmüş B4 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 8. Bilyalı değirmende öğütülmüş B4 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları

### 3.5 Yavaşlama etkisinin incelenmesi

Belirlenen ortam ve koşullarda öğütme süresi ilerledikçe birinci derece öğütme olması gerekirken artık lineer ya da orantılı olarak artışın (grafiksel olarak görülebildiği gibi) olmadığı öğütme süresine varıldığında bu öğütme süresi, değirmende yavaşlama etkisinin (slowing down effect) başladığı durum olarak değerlendirilmektedir.

İnce taneler (-38 µm) arttıkça, yavaşlama etkisine değirmenlerde daha çabuk ulaşılmaktadır ve bu olayın öğütülen malzeme, değirmen ortamı ve koşullarına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir.

Her iki değirmen tipindeki yavaşlama etkisini inceleyebilmek için farklı sürelerde yapılan öğütme işlemleri sonrası elde edilen 38µm altına geçen boyut miktarlarının öğütme süresine bağlı değişimi esas alınmıştır.

Tablo 3’te bilyalı değirmende öğütülen farklı barit cevherlerinin, öğütme sürelerine karşın elde edilen -38 µm



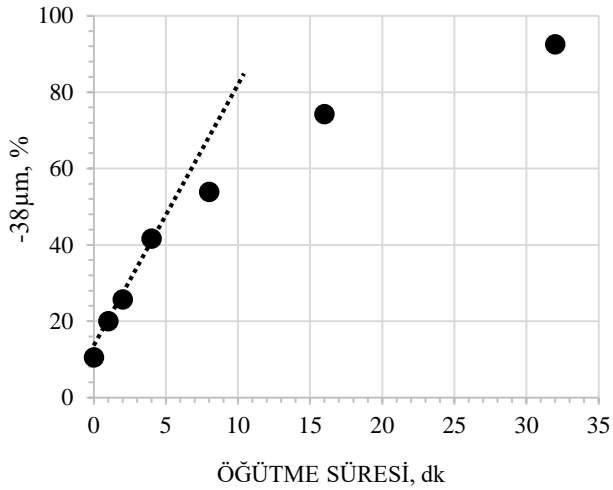
partikül boyutundaki miktarları verilmiştir. Yavaşlama etkisinin belirlenebilmesi için bilyalı değirmende öğütülmüş tüm barit cevherlerinin 38 µm altına geçen boyutlarına karşın öğütme süreleri grafiksel olarak Şekil 9’da gösterilmiştir.

Şekil 9’da da görüldüğü gibi, bilyalı değirmende B1 ve B2 cevherleri için yavaşlama etkisi 4 dakika sonra başlarken B3 ve B4 cevherleri için bu süre 8 dakika olarak

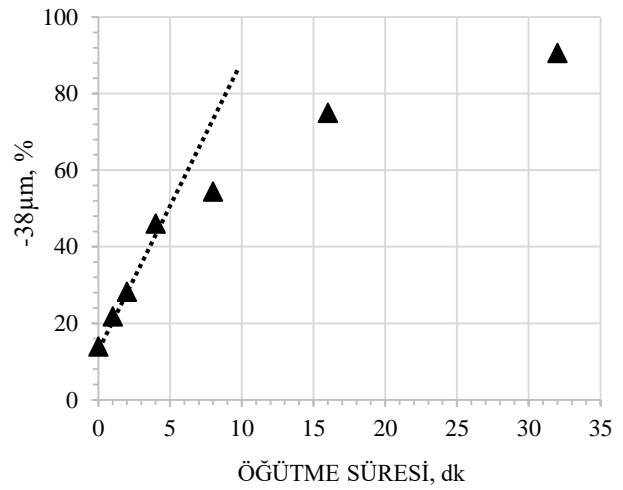
belirlenmiştir. Tablo 4’te ise çubuklu değirmende öğütülen farklı barit cevherlerinin, öğütme sürelerine karşın elde edilen -38 µm partikül boyutundaki miktarları ve Şekil 10’da yavaşlama etkisinin belirlenebilmesi için çubuklu değirmende öğütülmüş tüm barit cevherlerinin 38 µm altına geçen boyutlarına karşın öğütme süreleri grafiksel olarak verilmiştir.

**Tablo 3.** Farklı kompozisyonlardaki barit cevherlerinin bilyalı değirmende öğütülmesi sonucu 38 µm altı partikül boyutuna geçen ürün miktarları

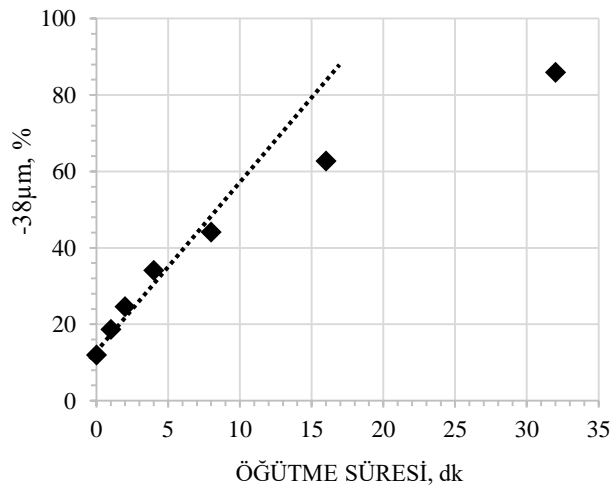
NUMUNE ADI	ÖĞÜTME SÜRESİ, dk						
	0	1	2	4	8	16	32
	38 µm Elek Altı (%)						
B1	10.53	20.01	25.68	41.64	53.85	74.25	92.56
B2	13.98	21.81	28.21	46.02	54.42	74.99	90.63
B3	12.03	18.72	24.66	34.08	44.19	62.73	86.00
B4	11.54	17.83	22.74	31.32	44.43	64.54	79.58



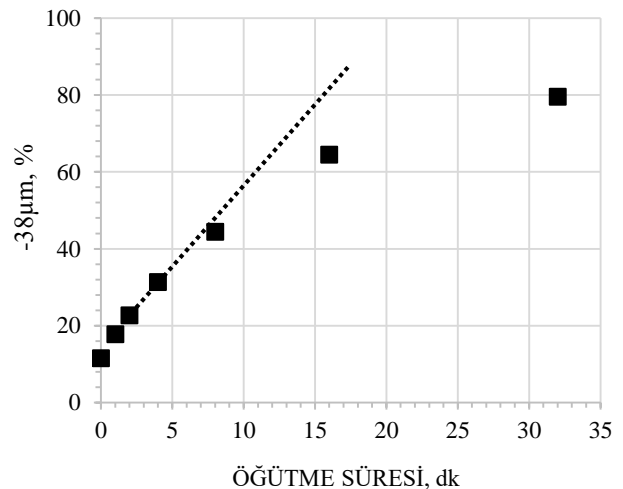
(a)



(b)



(c)

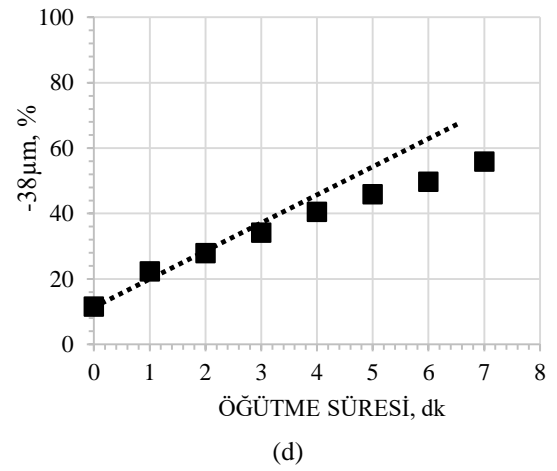
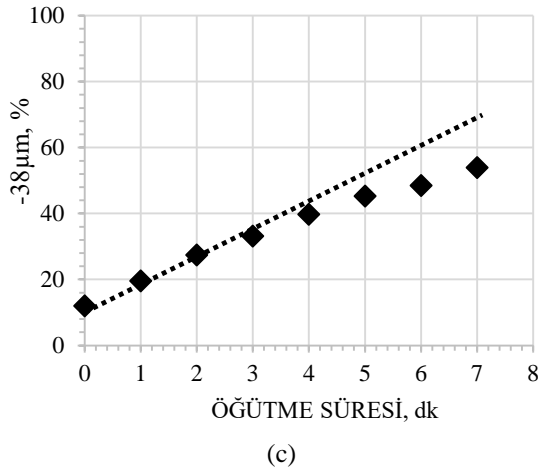
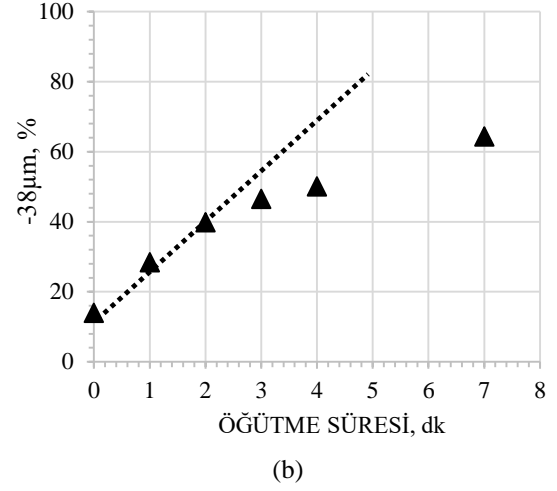
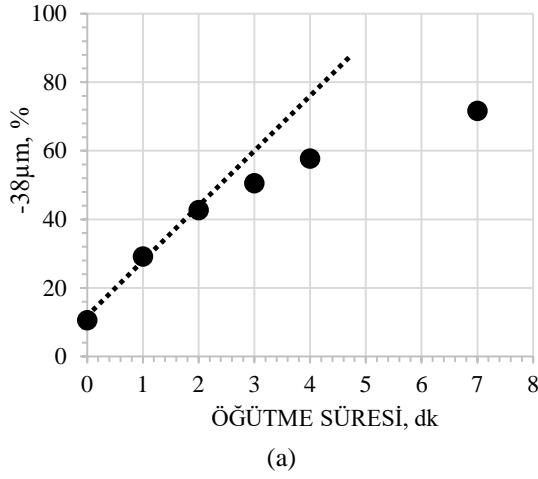


(d)

**Şekil 9.** Bilyalı değirmende öğütülmüş numunelerinin yavaşlama etkisini belirlemek için 38 µm boyutunun altına geçen miktarlara karşılık öğütme süreleri ilişkisi (a) B1, (b) B2, (c) B3 ve (d) B4 numunesi

**Tablo 4.** Farklı kompozisyonlardaki barit cevherlerinin çubuklu değirmende öğütülmesi sonucu 38 µm altı partikül boyutuna geçen ürün miktarları

NUMUNE ADI	ÖĞÜTME SÜRESİ, dk							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	38 µm Elek Altı (%)							
B1	10.53	29.13	42.65	50.49	57.67	-	-	71.66
B2	13.98	28.42	39.88	46.52	50.12	-	-	64.40
B3	12.03	19.53	27.40	33.11	39.79	45.26	48.46	53.90
B4	11.54	22.36	27.90	34.22	40.51	45.89	49.73	55.89



**Şekil 10.** Bilyalı değirmende öğütülmüş numunelerinin yavaşlama etkisini belirlemek için 38 µm boyutunun altına geçen miktarlara karşılık öğütme süreleri ilişkisi (a) B1, (b) B2, (c) B3 ve (d) B4 numunesi

Çubuklu değirmende tenörü yüksek olan (baritçe zengin) B1 ve B2 numunelerinde yavaşlama etkisi 2 dakikadan sonra başlarken, düşük tenörlü B3 ve B4 numunelerinde 4 dakika sonra başlamıştır. Bu durum Şekil 10'da da görülmektedir.

Çubuklu değirmende, öğütücü ortamdaki, ince partikül miktarının 3 dakika gibi kısa bir sürede elde edilmesinden dolayı, yavaşlama etkisinin bilyalı değirmene göre, daha erken sürelerde karşılaştığı belirlenmiştir. Başka bir ifade ile, bilyalı değirmendeki yavaşlama etkisinin daha yüksek olmasının nedeni, istenilen partikül boyutu için, ürettiği ince partiküller, çubuklu değirmene göre daha uzun sürede elde edilmiştir.

B1 numunesinin kuvars (SiO<sub>2</sub>) içeriği % 0.021, B2 numunesinin % 5.12 iken B3 numunesinin % 34.91 ve B4 numunesinin ise % 36.81'dir. Belirlenen yavaşlama etkileri incelendiğinde kuvars içeriğinin artmasıyla yavaşlama sürelerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

#### 4 Sonuçlar

Kimyasal içerikler, tenör farklılıkları ve safsızlıklar dikkate alındığında benzer özellik gösteren numunelerin kırılma özelliklerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yüksek tenörlü B1 ve B2 numunesi, bilyalı değirmende 8 dakika, çubuklu değirmende 3 dakika öğütüldüğünde -212 µm partikül boyutu elde edilmiştir.

Buna karşın, B3 ve B4 numuneleri bilyalı değirmende 16 dakika, çubuklu değirmen 6 dakika öğütüldüğünde istenilen partikül boyutu elde edilebilmiştir. B3 ve B4 numunelerinin -212 µm partikül boyutuna erişmek için öğütme sürelerindeki gözle görülen artışın cevherin kuvars (SiO<sub>2</sub>) içeriğinden kaynaklı olduğu görülmektedir. Barit mineralinin öğütülmesinde kullanılan bilyalı ve çubuklu değirmen karşılaştırıldığında, hem öğütme süresi, hem enerji verimliliği açısından çubuklu değirmenin daha verimli olduğu görülmüştür.

Bilyalı değirmende yavaşlama etkisine yüksek tenörlü B1 ve B2 numunesi için 4 dakika, düşük tenörlü B3 ve B4 numunesi için 8 dakika sonra girerken, çubuklu değirmende, B1 ve B2 numuneleri için yavaşlama etkisi 2 dakika, B3 ve B4 numuneleri için 4 dakika sonra girilmiştir. Sonuç olarak, gang olarak barit cevherinde bulunan kuvars mineralinin öğütme süresi ve yavaşlama etkisinde önemli rol oynadığı görülmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %12

#### Kaynaklar

- [1] P. A. Ciullo, Industrial Minerals and Their Uses: A Handbook and Formulary. In: P. A. Ciullo, The Industrial Minerals – Barite, by Noyes Publication, New Jersey, ABD, 21-23, 1996.
- [2] L. Qi, J. Ma, H. Cheng and Z. Zhao, Preparation of BaSO<sub>4</sub> nanoparticles in non-ionic w/o microemulsions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 108(1), 117–126, 1996. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03317-3](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03317-3).
- [3] D. Katircioğlu Bayel, Ö. Y. Toraman ve Ş. G. Özkan, Baritin yaş öğütülmesinde öğütme parametrelerinin etkisi. Yer Altı Kaynakları Dergisi 14, 31–43, 2018.
- [4] J. R. Kyle, The Barite Industry and Resources of Texas. Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, 85, 1994.
- [5] E. Sibbing, Barytes, Raw Material for Fillers and Chemicals, in Fleming, R. F. S., Ed., Proceedings, First Industrial Minerals International Congress: London, Metal Bulletin Ltd., 150-158, 1975.
- [6] D. A. Brobst, Barium Minerals, In D.D. Carr, Editor, Industrial Minerals and Rocks, 6th edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 125-134, 1994.
- [7] J. Massone, Technology and uses of barium and strontium compounds: Industrial Minerals, No. 177, 65-69, 1982.
- [8] J. Griffiths, Barytes: Non-drilling applications: Industrial Minerals, no. 201, 21-33, 1984.
- [9] Özel İhtisas Komisyonu Raporu (ÖİKR), Kalkınma Bakanlığı, Madencilik Politikaları, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), Yayın No: Kb: 3041 - Öik: 822, Ankara, 2018.
- [10] C. Aldrich, Consumption of steel grinding media in mills – A Review. Miner. Eng. 49, 77–91, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>.
- [11] J. Jeswiet and A. Szekeres, Energy consumption in mining comminution. Procedia CIRP 48, 140–145, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>.
- [12] V. Deniz, Y. Akkurt and Y. Umucu, A new model on breakage behaviour of a laboratory impact mill. The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, pp. 229–232, Turkey, Izmir, 2005.
- [13] L. G. Austin and O. Trass, Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment, in: M.E. Fayed, L. Otten (Eds.), Handbook of Powder Science and Technology, Van Nostrand Reinhold, The Netherlands. pp. 586–634, 1984. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0_12)
- [14] K. S. Liddell, Machines for fine milling to improve the recovery of gold from calcines and pyrite, Proceeding of the International Conference on Gold, Extractive Metallurgy of Gold, 2, pp. 405- 417, 1986.
- [15] H. Hacifazlıoğlu, İnce ve çok ince öğütme için alternatif değirmen tiplerinin tanıtılması, AKÜ Fen Bilimleri Dergisi 01, 17–30, 2009.
- [16] M. Yekeler, Bilyalı değirmenle kuvarsin yaş öğütülme kinetiği, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, pp. 179-184, 1995.
- [17] L. G. Austin and P. Bagga, An analysis of fine dry grinding in ball mills. Powder Technology, 28(1), 83-90, 1981. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(81\)87014-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(81)87014-3).
- [18] E. Teke, M. Yekeler, U. Ulusoy and M. Canbazoglu, Kinetics of dry grinding of industrial minerals: calcite and barite. International Journal of Mineral Processing, 67(1–4), 29–42, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00006-6).
- [19] A. Ozkan, M. Yekeler and S. Aydoğan, Breakage parameters of some minerals and coals ground in a laboratory size ceramic mill. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 10(4), 269–276, 2003.
- [20] M. J. Metzger and B. J. Glasser, Simulation of the breakage of bonded agglomerates in a ball mill. Powder Technology, 237, 286–302, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.006>.
- [21] R. P. King, Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems, first ed. Butterworth-Heinemann., 160, 2001.
- [22] V. Deniz, The effects of ball filling and ball diameter on kinetic breakage parameters of barite powder. Advanced Powder Technology, 23(5), 640–646, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2011.07.006>
- [23] M. Yekeler, A. Özkan ve E. Teke, Barit mineralinin ince öğütülmesinin kinetiği. 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 154-159, İzmir, Türkiye, 1997.
- [24] K. B. Quast and P. G. Hicks, Laboratory Studies in Comminution: Part VI; The specific rate of breakage for rod and ball milling of quartz (1), 1–7, 1998.





## The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites

### Jüt/karbon elyaf takviyeli hibrit kompozitlerde farklı tip matris malzeme kullanımının mekanik karakteristiklere etkisi

Berkay Karacor<sup>1,\*</sup> , Mustafa Özcanlı<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Cukurova University, Department of Automotive Engineering, 01330, Adana, Turkey

#### Abstract

The use of natural fibers in the automotive industry as potentially renewable and environmentally friendly materials is increasing day by day. Natural fiber reinforced polymer composites are also replacing traditional materials in the vehicle interior and exterior of the current automobile industry. This study focuses on the fabrication of hybrid composite materials reinforced with jute fibers and carbon fibers using two different thermoset resins such as epoxy and polyester. During this production, vacuum assisted resin transfer molding production technique was utilized. The hybrid composites were evaluated for tensile strength and hardness characterization. The surface morphology of the specimens broken after the mechanical tests were scrutinized using scanning electron microscopy. Results reveal that in the use of polyester resin in tensile strength, there is 3.29 times increase in hybrid structures compared to pure jute composites, and in the case of using epoxy resin there is 3.66 times increase in tensile strength. In the comparison of microhardness values, hybrid composites formed with jute/carbon fabric and polyester resin have a hardness value 1.6 times higher than structures with pure jute fabric and polyester resin. Hybrid composites formed with jute/carbon fabric and epoxy resin have 1.64 times higher hardness than the structure made with pure jute fabric and polyester resin. In the analysis of the surface morphology of the produced composite structures, it has been revealed that the mechanical features and physical characteristics give compatible results.

**Keywords:** Hybrid composites, Matrix material, Jute fiber, Carbon fiber, Mechanical properties

#### 1 Introduction

Today, natural fibers are widely used as a replacement for synthetic fibers, combining a high strength-to-weight ratio with low density, easy availability, biodegradability, cost reduction, and low weight. Along with their many advantages, natural fibers are disadvantaged in some areas compared to synthetic fibers due to low moisture resistance, poor adhesion with the matrix, low strength, low modulus, and low thermal stability. This disadvantageous situation can be improved with various combinations [1, 2]. Hybridizing these materials with higher strength fibers instead of using them alone as reinforcement is the most common method in

#### Öz

Doğal liflerin otomotiv endüstrisinde potansiyel olarak yenilenebilir ve çevre dostu malzemeler olarak kullanımı her geçen gün artmaktadır. Doğal elyaf takviyeli polimer kompozitler, mevcut otomobil endüstrisinin araç içi ve dışındaki geleneksel malzemelerin yerini alıyor. Bu çalışma, epoksi ve polyester gibi iki farklı termoset reçine kullanılarak jüt lifleri ve karbon lifleri ile güçlendirilmiş hibrit kompozit malzemelerin üretimine odaklanmaktadır. Bu üretim sırasında vakum destekli reçine transfer kalıplama üretim tekniği kullanılmıştır. Hibrit kompozitler, çekme mukavemeti ve sertlik karakterizasyonu için değerlendirildi. Mekanik testler sonrasında kırılan numunelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, çekme mukavemetinde polyester reçine kullanımında hibrit yapılarda saf jüt kompozitlere göre 3.29 kat, epoksi reçine kullanılması durumunda ise çekme mukavemetinde 3.66 kat artış olduğunu ortaya koymaktadır. Mikrosertlik değerleri karşılaştırıldığında, jüt/karbon kumaş ve polyester reçine ile oluşturulan hibrit kompozitler, saf jüt kumaş ve polyester reçineli yapılara göre 1.6 kat daha yüksek sertlik değerine sahiptir. Jüt/karbon kumaş ve epoksi reçine ile oluşturulan hibrit kompozitler, saf jüt kumaş ve polyester reçine ile yapılan yapıya göre 1.64 kat daha yüksek sertliğe sahiptir. Üretilen kompozit yapıların yüzey morfolojisinin analizinde mekanik özelliklerin ve fiziksel özelliklerin uyumlu sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Hibrit kompozitler, Matris malzemesi, Jüt elyaf, Karbon elyaf, Mekanik özellikler

these combinations, thus providing a better balance between mechanical properties and cost [3]. Hybrid composites are superior to homogeneous material components with their features such as high elasticity, high impact strength, low density, and high hardness. In many areas such as the automobile, defense, structural engineering, aerospace, transportation, and construction applications, hybrid composites are not only the main field of study for researchers, but their usage rates are increasing and they are becoming more popular [4, 5]. The main reasons for the increase in these rates are the resistance to corrosion, high strength, relatively reasonable production cost, good thermal

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bkaracor@cu.edu.tr (B. Karacor)

Geliş / Received: 28.02.2022 Kabul / Accepted: 23.03.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1080540



features, and availability, especially in composites where natural fiber is used as reinforcement. However, natural fiber reinforced materials have porous structures, acoustic and damping properties, and their recyclability reveals their benefits to the ecosystem [6]. In hybrid composites, the physical and mechanical characteristics are determined by the properties of the fiber forming the hybrid composite, the length of the fiber, the fiber aspect ratio, the fiber orientation, the fiber stacking order, and the adhesion between the fiber and the matrix [7]. However, in the application of natural fibers to composites, the hydrophobic property of the fibers is poorly matched to the hydrophobic character of the polymer matrix, resulting in poor mechanical features with poorly bonded interfaces in the composites [8]. Although the majority of the mechanical characteristics in composites are determined by both the reinforcement element and the matrix, the determining factor in corrosion, temperature, and chemical resistance parameters is the matrix material. In the production of composite materials, thermoset polymers are mostly used as matrix material [9,10]. Among the thermosets preferred in our current study, polyesters are more cost-effective resins than epoxy resins, which are synthetic or natural, are also grouped as aromatic or aliphatic according to their main chain groups. It has become a critical matrix material in studies where the mechanical strength, glass transition temperatures, chemical stability, and heat stability of polyesters are developed for use in high technology and advanced engineering fields. The characteristics of polyesters can be changed directly depending on the possible curing process at room temperature and high temperatures [11,12]. Epoxy, which is the other resin we use in our comparison with polyester, is the most common thermoset known for its higher thermal resistance, good moisture resistance, and low shrinkage value, although its cost is higher than other thermoset resins [13]. Natural fibers that are widely preferred in composite production are shown as jute, flax, banana, hemp, kenaf, and ramie. Jute takes more attention than other fibers because it is the second most produced natural fiber after cotton fiber and is at least 50% cheaper than linen and other natural fibers. While jute fibers consist of approximately 65-70% cellulose, 13.6%-20.4% hemicellulose, and 8% microfibril, the mechanical properties in fibers generally vary depending on the amount of cellulose and microfibril angles. Although jute fibers are very brittle, the high lignin content causes low elongation in the fibers and also has low resistance to moisture, acid, and UV light. However, with their fine textures, their resistance to heat and fire is at the forefront of being preferred in sectors like automotive, construction, and textile. Panels and other automotive components in vehicles in use are known to be made of jute fibers or other bio-thermoplastic and hybrid composites [14-17]. Carbon fibers, which are the most widely used synthetic fibers, are accepted for their, high electrical, thermal conductivity, high strength, and toughness features. Carbon fiber plays an important role in many composite products, as well as enabling new applications in the aerospace and automotive industries [18]. There are many studies in which carbon fiber and jute fiber are used as reinforcement elements, but the number of studies

comparing the use of resin using both polyester and epoxy resin is few. Ravikumar et al. [19] created hybrid material using bidirectional woven jute fiber and carbon fiber polyester resin and investigated the tribological properties of the formed material. According to the experimental and statistical data they obtained, they showed that the increase in sliding speed and load increased the wear loss, while the coefficient of friction decreased with increasing load and sliding speed. In another research using polyester resin, hybrid cardboard was produced using chopped carbon fibers and jute fibers. While the materials show anisotropic characteristics, carbon hybrid materials have obvious superiority in the impact test from mechanical tests, while cardboard fiber reinforced plastics have been found to give better results than raw carbon fiber and raw jute fiber reinforced plastics in tensile and bending tests [20]. In the studies where jute and polyester were used [21, 22], diverse thicknesses and different volume fractions were taken into account while determining the mechanical features. The determination of the optimum thickness and volume fractions by comparing the simulation results with the experimental results provides convenience in the design for the engineers regarding the possible range of mechanical properties. In spite of the mechanical characteristics of jute/polyester composites do not have as high strength and modulus as traditional composites, they have better strengths than wood composites and plastics, making them a good alternative to wood in drainage pipes, automobile components, electrical installations, roof coatings, interior partitions of houses. Albuquerque et al. researched the physical and mechanical features of the materials produced using two different polyester resins with and out of wetting agent ingredients as matrix material in uniaxially oriented jute reinforced composites. Their test results revealed that polyester type with wetting agents showed superior mechanical characteristics with better wetting on the fiber surface than polyester resin without wetting agents [23]. Saiteja et al. [24] contemplated a material alternative to conventional material in the automobile industry by applying carbon nanotubes at 5 different percentages to epoxy resin composites reinforced with jute fiber. In the results of the tensile and impact strength tests, they stated that 6% by volume carbon nano tube additive gave the best mechanical results, and in the flexural strength results, the strength increased up to 8% and decreased after 8%. In his study [25], Abd El-Baky investigated how hybridization, diverse fiber content, and stacking sequence affect the mechanical characteristics by producing jute, carbon, glass fiber with hand lay-up process. He found that the mechanical features of jute fibers increased with hybridization with synthetic fibers, the fabric ordering had no effect on the tensile strength, but the outer high-strength fiber gave better results in bending strength, and the highest void content was obtained in pure jute fiber and epoxy hybrid composites. Ali et al. [26] observed both numerically and experimentally the flexural strength of jute and carbon fiber and the falling impact test. They concluded that as the percentage of carbon fiber decreased from 80% to 40% in the bending tests, the strength value decreased by approximately 53%, and the

decrease in the carbon fiber percentage in the falling impact test caused the damaged area to enlarge. While they state that the experimental and numerical results differ by 10%, they say that the two analyzes are compatible. Ramana and Ramprasad [27] compared the combination of jute fiber and carbon fiber hybrid composite with pure carbon fiber and pure jute fiber composites. Whilst the results were in favor of homogeneous carbon composites with 1.73 times higher in tensile test and 1.18 times higher flexural test, jute/carbon hybrid composites exhibited a 46.15% rate higher energy absorption in the impact test. Velu et al. [28] created hybrid composite material combinations using carbon, jute, and glass fiber in 6 different arrays. When the tensile test results were examined, the use of carbon fiber instead of glass fiber in the JJGG array increased the strength by 16.34%, by 20.41% in the bending test, and by 54.22% in the impact test. Ashworth et al. [29] searched the mechanical and damping characteristics of the materials by producing jute, carbon, and hybrid composite specimens using the resin transfer molding method at pressures ranging from 4 bar to 8 bar. Mold pressure rising from 4 bar to 8 bar caused a 38% decrease in tensile strength in pure jute fiber composites, while a 6% decrease was detected in hybrid composites. Vibration test results also showed that the good bending performance of jute/carbon composites can replace pure carbon fiber composites in structural applications where cost is important. The aim of this research is to produce hybrid composites using two different resins such as epoxy and polyester, which are not frequently encountered in previous studies, and to explore the effect of using various resins on mechanical characteristics in these hybrid composites formed by jute fiber and carbon fiber reinforcement. According to the results obtained from these hybrid composites, the potential of using the composites produced in the automotive interior or exterior of the vehicle will be revealed.

## 2 Material and methods

### 2.1 Material

Jute plain woven texture and carbon plain woven texture were supplied by companies located in Istanbul. These textures were utilized as reinforcement materials. Table 1 gives these texture characteristics used in this research. Figure 1 indicates the fabric specimens.

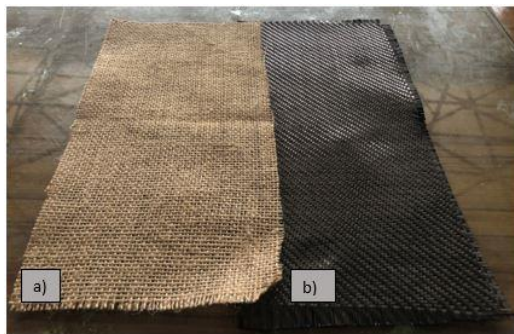


Figure 1. Fabric specimens: a) Jute fabric b) Carbon fabric

Table 1. Fabric characteristics [30, 31]

Fabric	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Fabric Thickness (mm)	Warp (tex)	Weft (tex)
Jute fabric	250	0.4	-	-
Carbon fabric	200	0.25	200	200

In this work, the related hardener LH160 and L160 epoxy resin, polyester, and its accelerator and hardener were utilized as matrix material. The epoxy resin and hardener were supplied by the Kompozitshop company and the Polyester material was purchased from the Poliya company. The specific features of the matrix arrangement are demonstrated in Table 2 and Table 3. When mixing epoxy resin and hardener, a weight ratio of 100:25±2 is chosen, which is given by the manufacturer and from previous studies, while the mixing ratio for vinyl ester resin is Resin: cobalt naphthalate (as an accelerator): methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) of 1:0.002:0.02 by weight.

Table 2. Hardener and epoxy characteristics [32]

	LH160 Hardener	L160 Epoxy
Density (g / cm <sup>3</sup> )	0.96-1.0	1.13-1.17
Process temperature (° C)	-	+10 / +50
Actuation temperature (° C)	-	-60/+50 except heat treatment -60/+80 by performing heat treatment
Viscosity (mPas)	10-50	700-900
Amine value (mg KOH /g)	550-650	-
Refractor index	1.520-1.521	1.548-1.553
Mensuration circumstances	25°C	25°C

Table 3. Polyester characteristics [33]

Maximum temperature (°C)	170
Flexural strength (MPa)	134
Elongation at break (%)	2.6
Viscosity (cps)	500-600
Tensile strength (MPa)	71
Barcol hardness	40

In this search, twelve composite specimens were prepared using two different resins and with various fabric stacking arrays. The pattern names given to the composite specimens for the fabric laminas are as indicated in Table 4.

Table 4. Naming of prepared specimens

Pattern Name	Textile versions
J	Jute fabric
C	Carbon fabric
JC	Jute/Carbon fiber hybrid composite
JE	Jute fiber reinforced epoxy hybrid composite
CE	Carbon fiber reinforced epoxy hybrid composite
JCE	Jute/ Carbon fiber reinforced epoxy hybrid composite
JP	Jute fiber reinforced polyester hybrid composite
CP	Carbon fiber reinforced polyester hybrid composite
JCP	Jute/ Carbon fiber reinforced polyester hybrid composite

After curing the specimens for 1 hour in the oven at 60 °C, they were cut off with a water jet device in the test sizes designated in the norms.

## 2.2 Method

The vacuum- assisted resin transfer molding (VARTM) method has been used for hybrid composites formed using jute and carbon fiber reinforced epoxy and polyester resin. In this technique, removing the air that may occur in the reinforcement material and entering the resin into the mold is provided by the vacuum force. The most important point to consider during fabrication is to ensure impermeability. All samples were produced at  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  using 1 bar pressure, as indicated in Figure 2. Firstly, the production area was determined based on the fabric dimensions. After the fabrics were lined up on the area in the predetermined order, the peel fabric, infusion net, and vacuum nylon were laid on top. Then the outlet and inlet hoses were connected to the system and the resin prepared in the determined mixing ratios was infused into the system. The vacuum pump was actuated at one bar for approximately two hours until surplus resin movement ceased. The specimens were cured as such for 24 hours. The specimens taken after 24 hours were post-cured in the oven at 60 °C for 1 hour and prepared for cutting with the waterjet.



Figure 2. VARTM technique

## 2.3 Tensile testing

The tensile test was used to determine the mechanical features of the produced composites. For the tensile test, the specimens were prepared with respect to the ASTM D3039 standard with a length of 250 mm, a width of 25 mm, and a thickness of 2.5 mm. The tests were carried out with the ALSA Hydraulic test device (KOLUMAN Automotive Industry Laboratory). The tensile test of the materials was carried out with regards to the ASTM D 3039 rule [34]. The test was accomplished by adjusting the cross-head speed to 2 mm/min in the device with a 98000 kN load cell. The tensile testing device is displayed in Figure 3. The tests were implemented at room temperature, and the specimen sizes were entered into the computer program at the beginning of the test. After this test, the tensile strength, modulus of elasticity, and percent strain rate of the materials produced

were obtained, and the stress-strain graph was automatically drawn by the program. When the results of the 5 tested specimens were averaged, the characteristics related to the tensile strength of the produced composites were found.



Figure 3. Tensile testing machine

## 2.4 Hardness testing

Microhardness tests of the manufactured composite products were carried out using the Vickers hardness method. The measured Vickers hardness values are directly dependent on the applied load as well as the area created by the impression on the test surface of the material. In this method of measurement, the Vickers hardness measurement of the material is specified by the instrument forming a square alcove with measured diagonals in the indentation on the material. The shape of the indentation used in Vickers hardness testing is the geometric configuration of a square pyramid of diamond with an angle of  $136^{\circ}$  between the opposing faces. Hardness testing of the specimens was carried out using an AOB Lab product machine with reference to ASTM E92-17 standard [35]. Figure 4 demonstrates the Vickers hardness testing device. Fifteen hardness measurements were made on the prepared specimen and the average of the 15 values was reported as the Vickers hardness value of the composite product.



Figure 4. Hardness testing machine

## 2.5 Morphological analysis

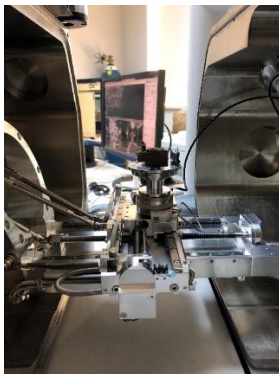
Scanning Electron Microscopy (SEM) FEI Quanta 650 Field Emission instrument was used to analyze interfacial surface morphologies of the composite samples. In order to increase the surface conductivity of the samples, the surface



coating was done with gold with the instrument in [Figure 5](#). The aggrandizement capacity of the instrument is in the range of 6-1,000,000 x times and can be operated at 30 kV. SEM analyzes were carried out in CUMERLAB (CUKUROVA UNIVERSITY RESEARCH CENTER LABORATORY) using the instrument shown in [Figure 6](#). With this analysis, it is possible to observe the fracture surface of the composite samples and observe the fiber-matrix interactions, interfacial characteristics of the material such as matrix cracking, fiber shrinkage, fiber breakage, and separation of fiber-matrix bonds.



**Figure 5.** Gold plating process machine



**Figure 6.** SEM analysis device

### 3 Result and discussions

#### 3.1 Tensile test results

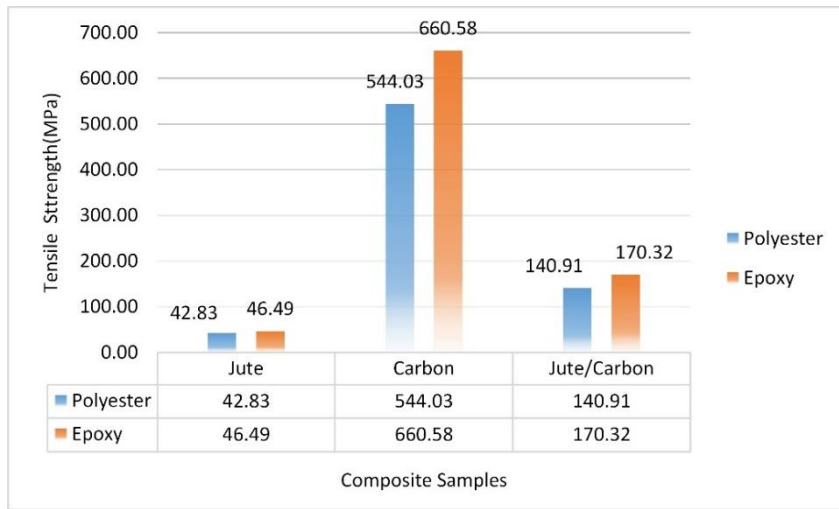
According to tensile test outcomes, hybrid composites that were used epoxy resin as a matrix, they have higher tensile strength than using polyester resin as a matrix as seen in [Figure 7](#). When comparing JCE and JCP hybrid composites, the JCE structure has a 20.87% superiority in tensile strength. The difference between these tensile strength values is 8.54% between JE and JP composite structures and 21.42% between CE and CP composite structures. These differences are in favor of composite structures using epoxy resin in both homogeneous composite structures. In similar studies [\[36\]](#), it was figured out the tensile strength values of hybrid Jute/Carbon epoxy composites were higher by 7.35% to 19.94% compared to hybrid Jute/Carbon polyester composites. Considering these ratios, the close difference in tensile strength values between JE and JP may have arisen due to the inability of resins and natural fiber to bond well. The difference of 21.42% between

CE and CP values indicates that the bonding of carbon fiber and epoxy is stronger than the adhesion between carbon fiber and polyester resin. In addition, the fact that carbon fiber fabric is structurally stronger and harder than jute fiber fabric, and the brittleness of jute fibers due to their natural structure has led to higher strength values of structures using carbon fiber [\[37\]](#). The tensile strength value of hybrid composites formed by jute fabric using polyester resin and carbon fabric is 229% higher than homogeneous jute polyester composite products. It is seen that the tensile strength value of hybrid Jute/Carbon structures in which epoxy resin is used is 266.35% higher than the tensile strength value of homogeneous jute epoxy structures.

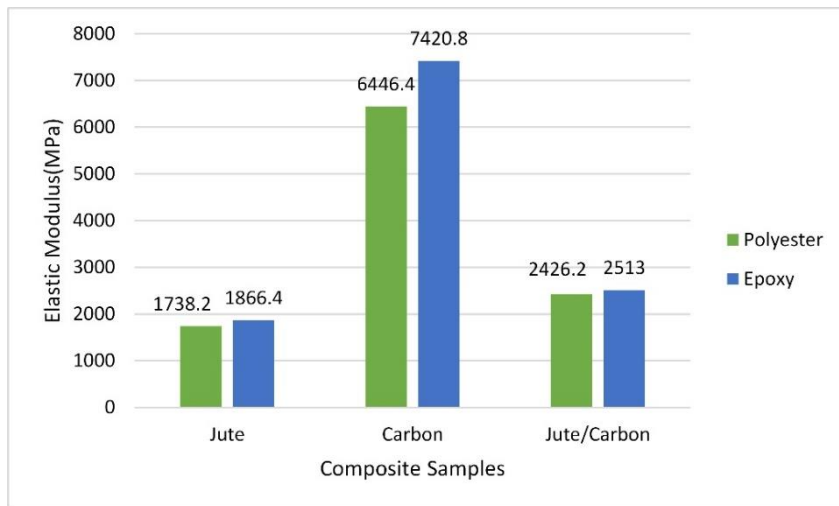
When the elastic modulus values in [Figure 8](#) were examined, it was found that CE and CP homogeneous composites had the highest values (7420.8 MPa and 6446.4 MPa) in samples produced with epoxy and polyester resins. The lowest elastic modulus values were obtained in JE and JP homogeneous composites, with 1866.4 MPa and 1738.2 MPa values, respectively, in products prepared with epoxy and polyester resin. It was observed that the hybridization of jute fabrics with carbon fabrics increased the modulus of elasticity value of hybrid composites by 1.42 times with the use of polyester resin, and 1.35 times the modulus of elasticity value of hybrid composites with the use of epoxy resin. Similar results were also observed in previous studies [\[38\]](#) when hybrid composites were obtained by adding jute fibers to homogeneous carbon fiber composites. It has been stated that the weak mechanical features of jute fiber are eliminated from the covalent bonds along the longitudinal direction of carbon fibers, and improved mechanical properties are achieved in hybrid structures compared to homogeneous jute composites.

A comparison of the percent elongation rates of the manufactured products is given in [Figure 9](#). The results of percent elongation rates showed that similar to the results of tensile strength and elastic modulus values, structures formed with epoxy resin have superior rates than structures formed with polyester resin. The percent elongation ratio difference between JCE and JCP structures is 1.08 times, and this difference is in favor of the JCE structure prepared with epoxy resin. The low tensile strength in polyester resin, as well as the adhesion between carbon fibers and resin, significantly affect the tensile strength of the hybrid composites produced [\[36\]](#). When comparing homogeneous jute composites in which polyester resin is used as matrix element and hybrid carbon/jute composites, it was understood that homogeneous composites had 1.78 times less elongation rate. In the comparison of the JE homogeneous structure using epoxy resin and the hybrid JCE structure, the hybrid composite structure has a 1.58 times higher elongation rate. These elongation rates also indicate that the hybridization process of carbon fibers with high tensile strength features with jute fibers with low mechanical features provides a remarkable improvement in the mechanical characteristics of hybrid jute/carbon structures compared to non-hybrid jute composite structures.

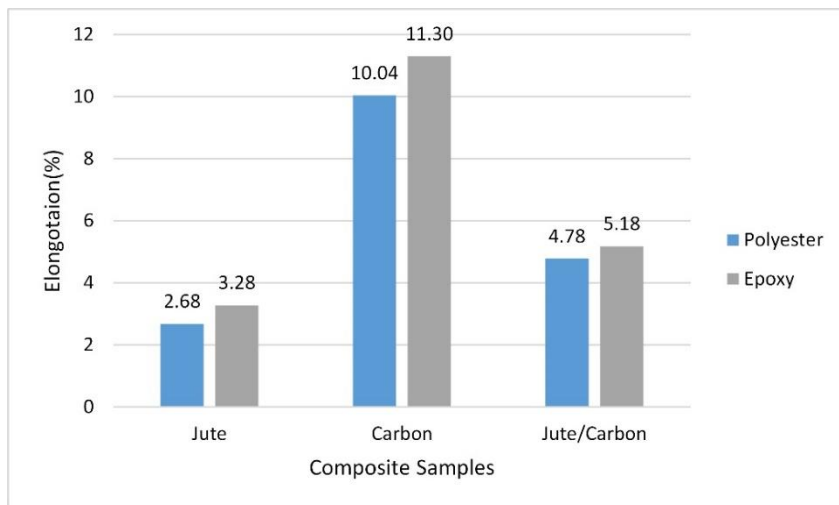




**Figure 7.** Comparison of tensile strength results



**Figure 8.** Comparison of elastic modulus results



**Figure 9.** Comparison of elongation rate results

### 3.2 Hardness test results

The microhardness results of the produced products are presented in Figure 10. While the JP composite structure prepared with pure jute fabric polyester resin had the lowest Vickers hardness value, the highest hardness value was found in the CE structure prepared with pure carbon fabric epoxy resin. In hybrid structures, on the other hand, hybrid JCE composites obtained 64.47% higher Vickers hardness values compared to pure JE composite structures, and 60.04% higher Vickers hardness values for hybrid JCP structures than pure JP structures. It can be seen from the results in the graph, hybridization of jute fibers with low mechanical features with high strength carbon fibers caused a significant increase in the hardness value. In addition, it has been found in previous studies that conditions that cause weak bonds between the matrix and the reinforcement, such as the addition of filler, lead to a decrease in the hardness value in carbon fiber composites [39,40]. In terms of the use of resins, the JCE composite structure has a 6.36% higher microhardness value than the JCP composite structure in hybrid composites. In both pure jute composites and pure carbon composites, the samples prepared with epoxy resin had superior Vickers hardness values compared to the specimens prepared with polyester resin at the rate of 3.91% and 21.95%, respectively. Both tensile strength and hardness values indicate parallel trends in terms of resin usage.

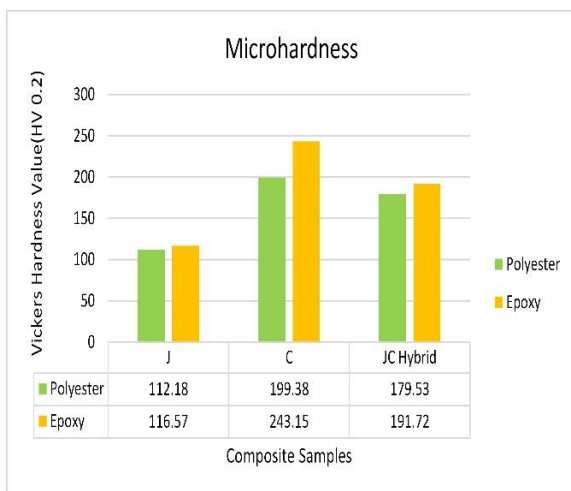


Figure 10. Micro hardness test results

### 3.3 SEM analysis results

Figures 11,12, and 13 demonstrate the SEM micrograph of fractured surfaces of JP, CP, and JCP structures after the tensile test. While fracture and rupture are seen in jute fibers in Figure 11, it is observed that carbon fibers break in bundles in Figure 12. It is expressed that the appearance of jute fiber breakage indicates the weak interfacial structure and the poor compatibility of the jute fiber and the matrix may be due to the bonding problem of the hydrophilic jute fiber and the hydrophobic polyester matrix [41]. In Figure 13, it is seen that in jute/carbon hybrid composites, there is less hollow structure compared to pure jute composites, and

carbon fibers break in bundles and strengthen the structure even more. In addition, damages such as fiber breakage, fiber shrinkage, and matrix and fiber separation have been observed in hybrid composite structures formed by using jute fiber and polyester resin in previous studies [42].

Figures 14,15, and 16 depict the SEM image of JE, CE, and JCE composites. In comparison to SEM images of JP, CP, and JCP, fiber and matrix bonding is stronger and less fiber pull out, breakage was been observed. This good interfacial bonding reflects how the tensile strength of structures using epoxy resin is increased compared to those using polyester resin [41]. In the structure formed by jute fiber with epoxy resin, as shown in Figure 14, hollow structures were observed, but fiber shrinkage and breakage are less common than the JP structure in Figure 11. It is also a situation stated in previous studies that damages occur more in areas with dense matrix [43]. In the SEM image in Figure 15, the matrix and fiber form strong bonds in CE structures, and homogeneous breaks were detected. It has been determined that the matrix and fiber form strong bonds in the JCE hybrid structures in Figure 15 and homogeneous breaks occur in the structure. The occurrence of less fiber breakage and shrinkage in Figure 16 compared to Figure 13 explains why the JCE structure has higher tensile strength than the JCP structure.

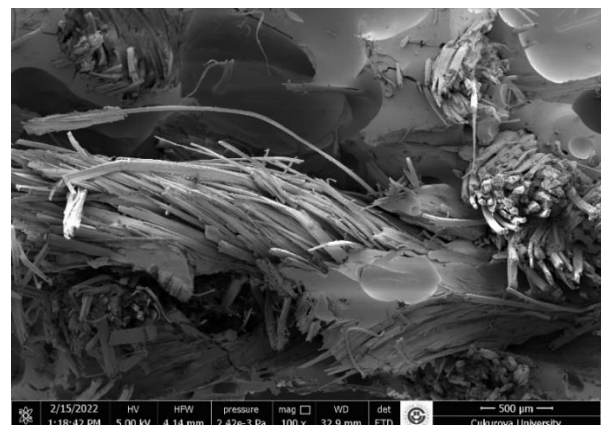


Figure 11. JP composites SEM micrograph

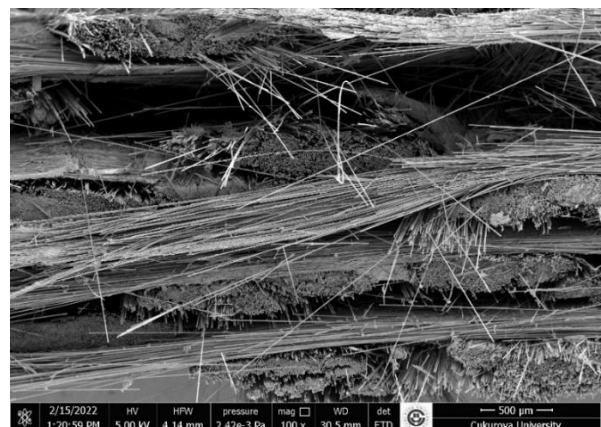


Figure 12. CP composites SEM micrograph

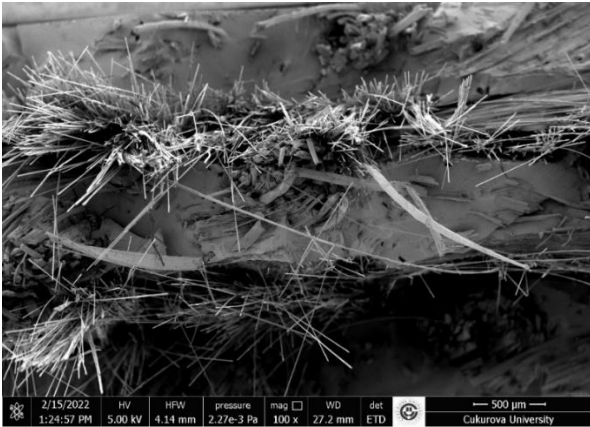


Figure 13. JCP composites SEM micrograph



Figure 15. CE composites SEM micrograph

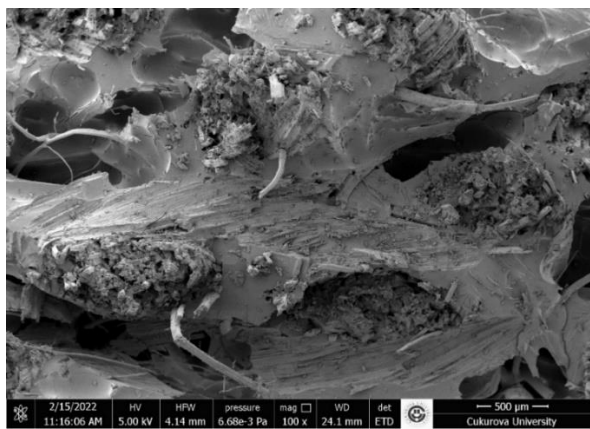


Figure 14. JE composites SEM micrograph

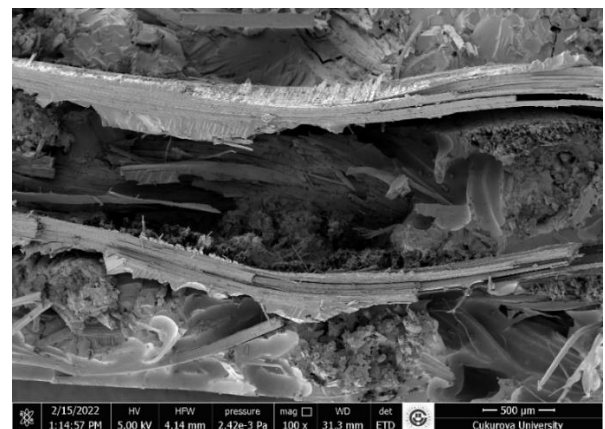


Figure 16. JCE composites SEM micrograph

#### 4 Conclusions

In this experimental study, pure jute composites, pure carbon composites, and jute/carbon hybrid composites were prepared with two different resins. The effects of polyester and epoxy resins on the mechanical characteristics (tensile strength and hardness) of the fabricated products were determined. Predicated on the information in the paper, the ensuing outcomes were derived:

- The hybrid composites prepared with epoxy resin provided the highest tensile strength, tensile modulus, and hardness compared to the hybrid composites fabricated with polyester resin.
- For the hybrid composites fabricated, a tensile strength value for the JCE sample was found to be 170.32 MPa, while the value of 140.91 MPa was found for the JCP sample, in the meanwhile the tensile modulus value of the JCE sample was 3.57% higher than that of the JCP sample.
- Hybridization of jute and carbon fabric resulted in an increment in tensile strength increase of 3.28 times for JCP structures compared to JP products and 3.66 times for JCE structures compared to JE structures.
- Hybridization of jute fabric with carbon fiber fabric increased the hardness value of JCP hybrid structures by 1.6 times compared to homogeneous JP structures, while the hardness value of JCE hybrid structures increased by 1.64 times compared to homogeneous JE structures.

- The usage of epoxy resin increased the hardness of the J, C, and JC hybrid specimens by 1.03 times, 1.22 times, and 1.07 times, respectively, compared to the usage of polyester resin.
- In SEM micrographs, less fiber shrinkage can be seen in the jute fiber composites made with epoxy resin than in the jute fiber composite structures produced with polyester resin. The fact that the polyester-resin interfacial bond of the jute fibers is not very strong causes more elongation.
- The SEM analysis depicts that the carbon fibers are broken into irregular bundles in the JCP structure, while there are more homogeneous fractures in the JCE type.

#### Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Similarity rate (iThenticate): 14%

#### References

- [1] Ankit, M. Rinawa, P. Chauhan, D. Suresh, S. Kumar, and R. Santhosh Kumar, A review on mechanical properties of natural fiber reinforced polymer (NFRP) composites. *Materials Today: Proceedings*, [Online] Available, Jul. 2021. [https://doi:10.1016/j.matpr.2021.07.275](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.275).
- [2] M. A. Abd El-Baky and M. Kamel, Abrasive Wear Performance of Jute-Glass-Carbon-Reinforced Composites: Effect of Stacking Sequence and Fibers



- Relative Amounts. *Journal of Natural Fibers*, 18(2), 213–228, Feb. 2021. [https://doi: 10.1080/15440478.2019.1616347](https://doi:10.1080/15440478.2019.1616347).
- [3] H. Sezgin and O. B. Berkalp, The effect of hybridization on significant characteristics of jute/glass and jute/carbon-reinforced composites. *Journal of Industrial Textiles*, 47(3), 283–296, Sep. 2017. [https://doi: 10.1177/1528083716644290](https://doi:10.1177/1528083716644290).
- [4] S. K. Tiwari, A. Umamaheswara Rao, N. Reddy, H. Sharma, and J. K. Pandey, Synthesis, characterization and finite element analysis of polypropylene composite reinforced by jute and carbon fiber. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10884–10891, 2021. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.897](https://doi:10.1016/j.matpr.2021.01.897).
- [5] S. R. M. Paladugu, N. Divya Aparna, and P. S. Rama Sreekanth, Experimental investigations and mechanical analysis of hybrid natural fibre reinforced composites. *Materials Today: Proceedings*, [Online]Available, Nov. 2021. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.272](https://doi:10.1016/j.matpr.2021.10.272).
- [6] P. B. A., A. Buradi, S. N., V. K. Vasu, J. Hatgundi, and H. D., Study on characterization of mechanical, thermal properties, machinability and biodegradability of natural fiber reinforced polymer composites and its applications, recent developments and future potentials: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, [Online]Available, Nov. 2021. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.049](https://doi:10.1016/j.matpr.2021.11.049).
- [7] N. Karthi, K. Kumaresan, S. Sathish, S. Gokulkumar, L. Prabhu, and N. Vigneshkumar, An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2828–2834, 2020. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.011](https://doi:10.1016/j.matpr.2020.01.011).
- [8] T.-T.-L. Doan, H. Brodowsky, and E. Mäder, Jute fibre/epoxy composites: Surface properties and interfacial adhesion. *Composites Science and Technology*, 72(10), 1160–1166, Jun. 2012. [https://doi: 10.1016/j.compscitech.2012.03.025](https://doi:10.1016/j.compscitech.2012.03.025).
- [9] K. Friedrich and A. A. Almajid, Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Applied Composite Materials*, 20(2), 107–128, Apr. 2013. [https://doi: 10.1007/s10443-012-9258-7](https://doi:10.1007/s10443-012-9258-7).
- [10] D. G. Lee and N. P. Suh, *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine Tools, and Automobiles*. Oxford University Press, New York, 2006.
- [11] M. Y. Mahmoud Zaghoul, M. M. Yousry Zaghoul, and M. M. Yousry Zaghoul, Developments in polyester composite materials – An in-depth review on natural fibres and nano fillers. *Composite Structures*, 278, 114698, Dec. 2021. <https://doi:10.1016/j.compstruct.2021.114698>.
- [12] B. Biswas, N. R. Bandyopadhyay, and A. Sinha, Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin-Based Composites. in *Unsaturated Polyester Resins*, S. Thomas, M. Hosur, and C. J. Chirayil, Eds. Elsevier, pp. 407–434, 2019.
- [13] B. Karacor, *The Usage of Natural Fiber Reinforced Hybrid Composite Materials as An Alternative to Automobile Interior Plastics*. MSc Thesis, Cukurova University, Adana, Turkey, 2020.
- [14] C. Alves, P.M.C. Ferrao, A.J. Silva, L.G. Reis, M. Freitas, L.B. Rodrigues, and D.E. Alves, Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. *Journal of Cleaner Production*, 18(4), 313–327, Mar. 2010. [https://doi: 10.1016/j.jclepro.2009.10.022](https://doi:10.1016/j.jclepro.2009.10.022).
- [15] H. Singh, J. Inder Preet Singh, S. Singh, V. Dhawan, and S. Kumar Tiwari, A Brief Review of Jute Fibre and Its Composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(14), 28427–28437, 2018. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.129](https://doi:10.1016/j.matpr.2018.10.129).
- [16] H. Song, J. Liu, K. He, and W. Ahmad, A comprehensive overview of jute fiber reinforced cementitious composites. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00724, Dec. 2021. [https://doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00724](https://doi:10.1016/j.cscm.2021.e00724).
- [17] M. H. Islam, M. R. Islam, M. Dulal, S. Afroj, and N. Karim, The effect of surface treatments and graphene-based modifications on mechanical properties of natural jute fiber composites: A review. *iScience*, 25(1), 103597, Jan. 2022. [https://doi: 10.1016/j.isci.2021.103597](https://doi:10.1016/j.isci.2021.103597).
- [18] S. Rani Borukati, B. Durga Prasad, and A. Ramesh, Development and Characterization of Natural Fiber /Carbon Fiber Reinforced Hybrid Composite Material. *Materials Today: Proceedings*, 18, 5394–5399, 2019. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.567](https://doi:10.1016/j.matpr.2019.07.567).
- [19] P. Ravikumar, A. R. Suresh, and G. Rajeshkumar, An Investigation into the Tribological Properties of Bidirectional Jute/Carbon Fiber Reinforced Polyester Hybrid Composites. *Journal of Natural Fibers*, 00(00), 1–11, May 2020. [https://doi: 10.1080/15440478.2020.1764444](https://doi:10.1080/15440478.2020.1764444).
- [20] T. Kitamura, Z. Zhang, M. Suda, K. Ito, S. Teramura, K. Kitai, and H. Hamada, Application of Paper Processing on Carbon, Jute and Paper Fiber Reinforced Plastic. *Energy Procedia*, 89, 231–238, 2016. [https://doi: 10.1016/j.egypro.2016.05.030](https://doi:10.1016/j.egypro.2016.05.030).
- [21] A. P. Abhishek, B. S. K. Gowda, G. L. E. Prasad, and R. Velmurugan, Probabilistic Study of Tensile and Flexure Properties of Untreated Jute Fiber Reinforced Polyester Composite. *Materials Today: Proceedings*, 4(10), 11050–11055, 2017. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2017.08.066](https://doi:10.1016/j.matpr.2017.08.066).
- [22] T. Munikenche Gowda, A. C. B. Naidu, and R. Chhaya, Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30(3), 277–284, 1999. [https://doi: 10.1016/S1359-835X\(98\)00157-2](https://doi:10.1016/S1359-835X(98)00157-2).
- [23] A. C. De Albuquerque, K. Joseph, L. Hecker De Carvalho, and J. R. M. D' Almeida, Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites. *Composites*



- Science and Technology, 60(6), 833–844, 2000. [https://doi: 10.1016/S0266-3538\(99\)00188-8](https://doi:10.1016/S0266-3538(99)00188-8).
- [24] J. Saiteja, V. Jayakumar, and G. Bharathiraja, Evaluation of mechanical properties of jute fiber/carbon nano tube filler reinforced hybrid polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 22, 756–758, 2020. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.110](https://doi:10.1016/j.matpr.2019.10.110).
- [25] M. A. Abd El-baky, Evaluation of mechanical properties of jute/glass/carbon fibers reinforced hybrid composites. *Fibers and Polymers*, 18(12), 2417–2432, 2017. [https://doi: 10.1007/s12221-017-7682-x](https://doi:10.1007/s12221-017-7682-x).
- [26] A. Ali, M. A. Nasir, M. Y. Khalid, S. Nauman, K. Shaker, S. Khushnood, K. Altaf, M. Zeeshan and A. Hussain, Experimental and numerical characterization of mechanical properties of carbon/jute fabric reinforced epoxy hybrid composites. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(9), 4217–4226, 2019. [https://doi: 10.1007/s12206-019-0817-9](https://doi:10.1007/s12206-019-0817-9).
- [27] M. V. Ramana and S. Ramprasad, Experimental Investigation on Jute/Carbon Fibre reinforced Epoxy based Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8654–8664, 2017. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.214](https://doi:10.1016/j.matpr.2017.07.214).
- [28] S. Velu, J. K. Joseph, M. Sivakumar, V. K. Bupesh Raja, K. Palanikumar, and N. Lenin, Experimental investigation on the mechanical properties of carbon-glass-jute fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3566–3571, 2021. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.333](https://doi:10.1016/j.matpr.2021.01.333).
- [29] S. Ashworth, J. Rongong, P. Wilson, and J. Meredith, Mechanical and damping properties of resin transfer moulded jute-carbon hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, 105, 60–66, 2016. [https://doi: 10.1016/j.compositesb.2016.08.019](https://doi:10.1016/j.compositesb.2016.08.019).
- [30] Kompozitshop, Carbon, Aramid, Intra-ply Carbon/Aramid. <https://www.kompozitshop.com/karbon-fiber-elyaf-takviyeler-carbon?view=0&pg=1>, Accessed 23 December 2021.
- [31] Kumascı, Technical Properties of Jute (250 gr per meter square). <https://www.kumascı.com/urun/kanavice-jut-telis-cuval-kumasi-ham-en-sik-jut-10-onz/1316>, Accessed 22 December 2021.
- [32] Kompozitshop, Epoxy and hardener. <https://www.kompozitshop.com/epoksi-recine-ve-sertlestirici>, Accessed 24 December 2021.
- [33] Poliya, Polyester Properties. <https://www.poliya.com/tr/el-yatirmasi-ve-elyaf-puskurtme>, Accessed 24 December 2021.
- [34] ASTM D3039/D3039-M, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material. ASTM International, 2000.
- [35] ASTM E92-17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. ASTM International, 2017
- [36] S. Margabandu and S. K. Subramaniam, Influence of fiber stacking sequences and matrix materials on mechanical and vibration behavior of jute/carbon hybrid composites. *World Journal of Engineering*, [Online]Available, Jun. 2021. [https://doi: 10.1108/WJE-01-2021-0008](https://doi:10.1108/WJE-01-2021-0008).
- [37] M. Abu Shaïd Sujon, M. A. Habib, and M. Z. Abedin, Experimental investigation of the mechanical and water absorption properties on fiber stacking sequence and orientation of jute/carbon epoxy hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10970–10981, 2020. [https://doi: 10.1016/j.jmrt.2020.07.079](https://doi:10.1016/j.jmrt.2020.07.079).
- [38] M. Y. Khalid, M. A. Nasir, A. Ali, A. Al Rashid, and M. R. Khan, Experimental and numerical characterization of tensile property of jute/carbon fabric reinforced epoxy hybrid composites. *SN Applied Sciences*, 2(4), 1–10, 2020. [https://doi: 10.1007/s42452-020-2403-2](https://doi:10.1007/s42452-020-2403-2).
- [39] H. Singh, N. K. Batra, and I. Dikshit, Development of new hybrid jute/carbon/fishbone reinforced polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 38, 29–33, 2020. [https://doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.520](https://doi:10.1016/j.matpr.2020.05.520).
- [40] M. Sathiyamoorthy and S. Senthilkumar, Mechanical, thermal, and water absorption behaviour of jute/carbon reinforced hybrid composites. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 45(1), 1–12, 2020. [https://doi: 10.1007/s12046-020-01514-y](https://doi:10.1007/s12046-020-01514-y).
- [41] P. RaviKumar, G. Rajeshkumar, J. Prakash Maran, N. A. Al-Dhabi, and P. Karuppiah, Evaluation of Mechanical and Water Absorption Behaviors of Jute/Carbon Fiber Reinforced Polyester Hybrid Composites. *Journal of Natural Fibers*, 00 (00),1–13, May 2021. <https://doi:10.1080/15440478.2021.1924339>.
- [42] N. H. Mostafa, M. B. Hunain, and A. Jassim, Mechanical properties of the Jute fibers-activated carbon filled reinforced polyester composites. *Materials Research Express*, 6(12), 125104, Nov. 2019. [https://doi: 10.1088/2053-1591/ab5566](https://doi:10.1088/2053-1591/ab5566).
- [43] Z. Arshad, M. A. Nasir, Y. Baig, M. Zeeshan, R. A. Malik, K. Shaker, A. Hussain, M. Latif, M. Sattar, and H. Alrobei, Drop weight impact and tension-tension loading fatigue behaviour of jute/carbon fibers reinforced epoxy-based hybrid composites. *Polymer (Korea)*, 44(5), 610–617, 2020. [https://doi: 10.7317/pk.2020.44.5.610](https://doi:10.7317/pk.2020.44.5.610).





## Bitki doku kültürlerinde ince hücre tabaka (TCL) kültür sistemi

### Thin cell layer (TCL) culture system in plant tissue cultures

Halide Hande Güngör<sup>1\*</sup> , Meltem Bayraktar<sup>2</sup> , Aynur Gürel<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoteknoloji Anabilim Dalı, 35040, İzmir Türkiye

<sup>2</sup> Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Genetik ve Biyomühendislik Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

<sup>3</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 35040, İzmir Türkiye

#### Öz

Bitki ıslahı ve yetiştiriciliği açısından büyük öneme sahip olan bitki doku kültürü teknikleri, özellikle *in vitro* koşullarda bitkisel üretim için çeşitli yöntemleri kapsayan geniş bir bilimsel alandır. *In vitro* koşullarda bitki üretiminde kullanılan tekniklerin başarısını etkileyen en önemli faktörlerden biri eksplant tipinin belirlenmesidir. İnce hücre tabaka (TCL) kültür sistemi ilk olarak 1973 yılında Tran Thanh Van tarafından ortaya atılmıştır. TCL kültür sistemi, ince hücre ve doku katmanlarını içeren uzunlamasına ya da enine kesilmiş eksplantların kültüre alınmasıyla, bu eksplantlardan doku, organ, embriyo veya tam bitki gibi yapıların rejenerasyonunun sağlandığı bir bitki doku kültürü tekniğidir. Bu teknik, *in vitro* mikroçoğaltım, sentetik tohum üretimi, kriyoprezervasyon ve genetik çalışmalarda başarı ile kullanılmaktadır. Bitki büyüme düzeltme faktörü ve geometrik faktör kavramları, bir TCL eksplantının rejenerasyon potansiyelinin geleneksel bir eksplantından daha büyük olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** İnce hücre tabaka, TCL, *in vitro*, rejenerasyon, eksplant

#### 1 Giriş

Geleneksel bitki doku kültürlerinde, küçük (hücre ve doku) veya büyük bitki kısımları (tam bir organ), *in vitro* rejenerasyon veya organogenez için eksplant olarak kullanılabilirler [1]. Eksplant, bir bitki doku kültürü protokolünde başarıyı etkileyen anahtar faktörlerden biridir. Genotip (tür ve çeşit), eksplantın alındığı doku veya organ kaynağı ve yaşı, eksplant boyutu ve şekli dahil olmak üzere bir dizi biyotik faktör, doku kültüründeki başarıyı etkilemektedir [2]. Eksplant seçimi, *in vitro* rejenerasyonun sonucunu belirleyebilmesinden dolayı, araştırmacıların herhangi bir doku kültürü denemesini başlatmadan önce optimize etmesi gereken önemli bir parametredir. Çünkü, *in vitro* rejenerasyon ortamına eklenen aynı bitki büyüme düzenleyicilerinin varlığında, farklı eksplantlar farklı yanıtlar gösterebilmektedir [1].

İnce Hücre Tabaka (TCL) teknolojisi, 1970'lerde tütün bitkisinin çiçek sapından alınan uzunlamasına TCL eksplantlarından çiçeklerin, köklerin, sürgünlerin ve somatik

#### Abstract

Plant tissue culture techniques, which are of great importance in terms of plant breeding and cultivation, are a wide scientific area that includes various methods for plant production especially in *in vitro* conditions. One of the most important factors affecting the success of the techniques used in plant production in *in vitro* conditions is determination of explant type. Thin cell layer (TCL) culture system was first described by Tran Thanh Van in 1973. TCL culture system is a plant tissue culture technique in which structures such as tissue, organs, embryos, or whole plants are regenerated by culturing longitudinally or transversely excised explants containing thin layers of cells and tissue. This technique has been successfully used in *in vitro* micropropagation, synthetic seed production, cryopreservation and genetic studies. The concepts of plant growth correction factor and geometric factor have shown that the regeneration potential of a TCL explant is greater than that of a conventional explant.

**Keywords:** Thin cell layer, TCL, *in vitro*, regeneration, explant

embriyoların kontrollü gelişimi ile ortaya çıkmıştır [3]. TCL kültür sistemi, eksplant olarak dokunun minimal kullanımını sağlamaktadır [4]. TCL sistemi, farklı bitki organlarından (gövde, yaprak, kök, çiçek salkımı, çiçek primordiyumu, kotiledon, apikal bölge, embriyo vb.) kesilerek elde edilen küçük boyutlu eksplantlardan oluşur [5]. Geleneksel eksplantların aksine; TCL teknolojisi, tipik olarak 0.1-2 mm kalınlığında ince veya ultra ince bitki kısımlarının kullanılmasını gerektirmektedir [1]. Eksplantlar mümkün olduğunca az sayıda hücre içerecek şekilde kesilmektedirler [5].

TCL'ler eksplantın kesilme düzlemine bağlı olarak iki kategoriye ayrılır. Birinci grup en yaygın tip olan ve kalınlığı 100 µm ile 1-2 mm arasında değişen enine TCL (transversally TCL: tTCL)'dir. İkinci kategori ise, aynı kalınlıkta ancak farklı uzunluklarda çok özel hücre katmanlarını kapsayan uzunlamasına TCL (longitudinally TCL: lTCL)'dir [6]. lTCL'ler, epidermal hücrelerin tek tabakasında olduğu gibi yalnızca bir doku tipini içerirlerken;

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: handegngr@gmail.com (H. H. Güngör)

Geliş / Received: 01.02.2022 Kabul / Accepted: 23.02.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1066541

tTCL'ler ise farklı doku tiplerine ait az sayıdaki hücreleri içerirler [7].

*Nicotiana tabacum*, *Lilium longiflorum*, *Dendranthema grandiflora* bitki türlerinden elde edilen TCL eksplantları üzerinde morfogenez, organ farklılaşması ve gelişimine yönelik yoğun şekilde çalışıldığı için TCL sistemleri açısından bu türler model bitkiler olarak kabul edilmişlerdir. Tütün (*N. tabacum*) en çok çalışılan bitkilerden biridir ve TCL terimi ve kavramının başlangıcından beri, diğer tüm TCL çalışmalarının dayandığı model sistem haline gelmiştir [3].

İlk ortaya çıktığından beri TCL'ler, geleneksel yöntemlerle *in vitro* rejenerasyonu başarılı olmayan birçok süs bitkisi türünün mikroçoğaltımında başarıyla kullanılmıştır [3]. Ayrıca TCL tekniği; tarla bitkileri, odunsu türler ve tıbbi bitkiler gibi pek çok bitki türüne de başarı ile uygulanmıştır [2, 8]. TCL eksplantlarının rejenerasyon potansiyeli açısından geleneksel eksplantlara kıyasla daha uygun bir eksplant olduğu da kanıtlanmıştır [9, 10]. Ekonomik açıdan önemli türlerin seri üretimini de mümkün kıldığından; TCL tekniği büyük avantaja sahiptir [6]. Geçtiğimiz son 30-40 yılda, eksplant olarak TCL'e dayanan yöntemler geliştirilmiş ve *in vitro* kitlesel çoğaltım, genetik transformasyon, sentetik tohum üretimi, kriyoprezervasyon ve *in vitro* seleksiyon için çok sayıda bitki türüne başarıyla uygulanmıştır [1, 2, 13, 50, 51]. Ayrıca TCL tekniği; bitkilerin hücre, doku ve organlarındaki farklılaşma ve totipotensi yeteneklerini değerlendirmek için de büyük bir deneysel fırsat sağlamaktadır [6].

TCL tekniği, bitki biliminde basit ve önemli bir biyoteknolojik araçtır. TCL tekniği ile spesifik organların morfogenetik özellikleri ve gelişimi yönlendirilebilir ve kontrol edilebilir [3, 6]. Bitkilerle ilgili genetik mühendisliği çalışmalarının önündeki en büyük engel, *in vitro* morfogenez ve rejenerasyonu kontrol edebilmenin zor olmasıdır. TCL sistemi, morfogenezi kontrol eden mekanizmaları inceleyebilmek için etkili bir araçtır. Geleneksel doku kültürü teknikleri ve uygulamalarının aksine, TCL sisteminin başarısının ardındaki esas mantık, TCL'lerin boyutlarının küçük olması ve az sayıda hücre içermeleridir [11].

## 2 İnce hücre tabaka kültür sistemine genel bir bakış

TCL sistemi kavramı ilk olarak 1973 yılında Tran Thanh Van tarafından ortaya atılmıştır. Tran Thanh Van *in vitro* yeniden programlamanın ve dolayısıyla bir organ veya embriyonun rejenerasyonunun, herhangi bir organ veya dokudan farklılaşmış hücrelerden izole edilen bir veya birkaç (3-6) tabaka ile mümkün olabileceğini açıklamıştır [2]. Bitki üzerindeki konumuna bakılmaksızın bitkinin herhangi bir kısmından alınan parçanın boyuta göre manipülasyonu ile organogenik potansiyeli kontrol edebilme fikri, TCL kavramının doğmasına sebep olmuştur [12]. Tran Thanh Van yaptığı çalışma ile; sadece oksin ve sitokin oranlarının manipülasyonu ile, tütünün çiçek sapı epidermal hücrelerinden alınan TCL'lerden çiçek, sürgün, kök ve kallus oluşumunun elde edilebileceğini göstermesi bitki doku kültürü tarihinde devrim niteliğinde bilgilere ulaşılmasını sağlamıştır [8]. Tütüne ilk uygulanmasından

sonra bitki doku kültüründe başka bitkilere de uygulanmasıyla, TCL'lerin birçok bitki türünün *in vitro* kültürlerinde etkili bir araç olduğu kanıtlanmıştır [1].

TCL farklı bitki organlarından (gövde, yaprak, kök, çiçek salkımı, çiçek, kotiledon, hipokotil, epikotil, apikal meristem, embriyo vb.) kesilen, az sayıda hücre veya doku içeren küçük boyutlu eksplantlardır. Adından da anlaşılacağı gibi, genellikle birkaç mm kalınlığında, ancak değişken oranlarda uzunluk ve çapa sahip ince bir hücre tabakasıdır [8, 13, 14]. Birkaç hücre katmanından oluşan TCL'ler genel olarak 0.5-1 mm kalınlığındadır [1]. Bir TCL'yi geleneksel bir eksplanttan ayıran en önemli faktör, yüzey/hacim oranı, boyutu ve kalınlığıdır [14]. TCL sistemi, eksplantın orijininin çok boyutuna odaklanmaktadır [15]. TCL'lerin şekli ve boyutu; hem üretildikleri organa hem de kesiliş şekline bağlıdır [2]. Kesiliş şekillerine göre, Tran Thanh Van tarafından iki tür TCL tanımlanmıştır: uzunlamasına TCL (ITCL-longitudinal TCL) ve enine TCL (tTCL-transverse TCL) [12]. Kullanımı daha yaygın olan tTCL eksplantlarının kalınlıkları 100 µm ile 1-2 mm arasında değişmektedir ve genellikle birkaç doku tipini içerirler. Buna karşılık; ITCL eksplantları çok spesifik bir hücre veya doku katmanını içerirlerken uzunlukları değişebilir, fakat kalınlıkları tTCL eksplantları kadardır [6, 14]. Uzunlamasına TCL'ler yalnızca bir doku tipini içerirlerken (örneğin; tek bir epidermal hücre tabakası veya birkaç (3-6) kortikal hücre tabakası); enine TCL'ler ise farklı doku tiplerinden (epidermal, kortikal, kambiyum, perivasküler- vasküler silindirin etrafında yer alan lifler- ve medüller doku- merkezi meristem dokuları ve ayrıca parankima hücreleri- vb.) az sayıda hücre ihtiva ederler [1, 12]. Yani; ITCL'ler epidermis ve sub-epidermis gibi yalnızca bir veya iki doku tipinden oluşurlarken, tTCL'ler ise çeşitli dokulara sahip olabilirler [1].

Bir enine TCL veya uzunlamasına TCL eksplantı, yeterince keskin bir bıçak kullanılarak herhangi bir doku veya organ tipinden hazırlanabilmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, TCL eksplantlarının elle hazırlandığı rapor edilmiş ve çalışmalarda mikrotom kullanımına rastlanmamıştır. TCL tekniği, küçük boyutu ve uygulamanın ince ölçekli doğası nedeniyle gerek hazırlamak ve gerekse geliştirmek için geleneksel bir eksplanttan birkaç kat daha zahmetli olsa da, geleneksel bir eksplanttan birkaç kat daha fazla organ sağlayabilmektedir. Literatürde, tTCL'ler bazen ince kesitler (thin cross sections: TCS) olarak adlandırılırlarken, ITCL'ler ise epidermal şeritler, ince epidermal tabakalar veya ince epidermal şeritler olarak da isimlendirilirler [14].

TCL'ler, gelişimsel ve organogenik oluşumları kontrol etmede basit ama etkili bir yol sunmaktadır ve böylece belirli organların klonlarının kitlesel üretimini mümkün kılmaktadır [8]. TCL eksplantlarının farklılaşma kapasitesi; doğru sinyal algılama ve iletimi, dahili genetik makinenin bu sinyallere tepki verme kapasitesine bağlıdır [3].

TCL konsepti 45 yıldan fazla bir süredir birçok bitki türünde başarı ile uygulanmıştır (Tablo 1). Bu bitkilerden bazıları; orkide türleri, tütün, *Arabidopsis thaliana* veya aslanagzı gibi model bitkiler, tarla bitkileri (tahıllar, kolza, pirinç), bahçe bitkileri (çeşitli meyve, sebze ve süs bitkileri), tıbbi bitkiler, orman ağaçları (*Pinus* sp.), odunsu meyve bit-

**Tablo 1.** TCL eksplantlarının *in vitro* organogenez ve embriyogenez için başarıyla kullanıldıkları çeşitli bitki türleri

Bitki Türü	TCL'in alındığı bitki kısmı	TCL tipi	Eksplant boyutu	Elde edilen rejenerasyon (embriyo, protokorm, tam bitki vb.)	Referans
<i>Agave fourcroydes</i> Lem.	<i>In vitro</i> bitkiciklerden yapraklar ve kökler kesildikten sonra kalan kısım	tTCL	0.5-1.0 mm kalınlık	Doğrudan somatik embriyo rejenerasyonu	[16]
<i>Allium ascalonicum</i>	<i>Ex vitro</i> koşullarda yetiştirilen soğanlardan elde edilen sürgün uçları	tTCL	Belirtilmemiş	Dolaylı <i>in vitro</i> sürgün rejenerasyonu	[17]
<i>Allium schoenoprasum</i> L.	<i>In vitro</i> sürgünlerden elde edilen yapraklar	tTCL	0.5, 2 ve 5 mm kalınlık	Doğrudan <i>in vitro</i> bitkicik rejenerasyonu	[18]
<i>Bacopa monnieri</i> (L.) Wettst	<i>In vitro</i> sürgünlerden elde edilen yapraklar ve internodlar	tTCL	<b>Yaprak:</b> uzunluk 3 mm'den genişlik 1 mm'den küçük <b>İnternod:</b> 1.5-2 mm çap ve 1-1.5 mm kalınlık	Doğrudan ve dolaylı <i>in vitro</i> sürgün rejenerasyonu	[4]
<i>Begonia tuberosus</i>	<i>Ex vitro</i> koşullarda yetiştirilen bitkilerin petiolleri, yaprak sapları ve gövdeleri	tTCL	1 mm kalınlık ve 10 mm çap	Dolaylı somatik embriyo rejenerasyonu	[19]
<i>Brassica napus</i> L.	<i>In vitro</i> fideciklerden elde edilen hipokotil ve petioller	tTCL	0.3-0.5 mm	Doğrudan ve dolaylı <i>in vitro</i> sürgün rejenerasyonu	[20]
<i>Cattleya forbesii</i> Lindl.	<i>In vitro</i> sürgünlerden elde edilen nodlu gövde kısımları ve protokorm	tTCL	<b>Gövde:</b> 0.5-1.5 mm kalınlık <b>Protokorm:</b> 1-2.5 mm kalınlık	Doğrudan protokorm benzeri yapılar ve sürgün rejenerasyonu	[21]
<i>Cymbidium Sleeping Nymph</i>	Protokorm	tTCL	0.5 mm	Doğrudan protokorm benzeri yapılar ve devamında sürgün rejenerasyonu	[22]
<i>Dendrobium aphyllum</i> Roxb	<i>Ex vitro</i> koşullarda yetiştirilen bitkilerden elde edilen nodlar	tTCL	0.1-0.4 mm	Doğrudan <i>in vitro</i> sürgün rejenerasyonu	[9]
<i>Dendrobium aqueum</i>	<i>In vitro</i> sürgünlerden elde edilen gövde	tTCL	0.5 mm kalınlık	Doğrudan somatik embriyo rejenerasyonu	[23]
<i>Dendrobium Candidum</i> Wall Ex Lindl.	<i>In vitro</i> sürgünlerden elde edilen nodlu gövde kısımları	tTCL	0.5 mm kalınlık	Doğrudan protokorm benzeri yapılar ve devamında sürgün rejenerasyonu	[24]
<i>Digitaria sanguinalis</i> L.	<i>In vitro</i> fideciklerden elde edilen apikal ve nodal bölgeler	tTCL	0.2-0.4 mm kalınlık ve 1 mm çap	Doğrudan <i>in vitro</i> bitkicik rejenerasyonu	[25]
<i>Eclipta alba</i>	<i>Ex vitro</i> koşullarda yetiştirilen bitkilerin nodal segmentleri	tTCL	1-3 mm kalınlık	Doğrudan <i>in vitro</i> sürgün rejenerasyonu	[26]
<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	<i>Ex vitro</i> koşullarda yetiştirilen bitkilerin yapraklar, kökler ve en dıştaki yeşil yapraklar uzaklaştırıldıktan sonra kalan doku	tTCL	0.8-1 mm	Dolaylı somatik embriyo rejenerasyonu ve devamında sürgün rejenerasyonu	[27]
<i>Ficus carica</i> L.	<i>Ex vitro</i> koşullarda yetiştirilen bitkilerin gövdeleri	tTCL	0.5-0.8 mm kalınlık ve 10 mm çap	Dolaylı <i>in vitro</i> sürgün rejenerasyonu	[28]
<i>Hadrolaelia grandis</i>	<i>In vitro</i> 'da çimlendirilmiş tohumlardan elde edilen 2-3 aylık protokormlar	tTCL-ITCL	0.5 mm kalınlık	Doğrudan protokorm benzeri yapılar ve devamında sürgün rejenerasyonu	[10]



<i>Jatropha curcas</i> L.	Ex vitro koşullarda yetiştirilen bitkilerin yaprak petiolleri	tTCL	0.8-1 mm kalınlık	Dolaylı somatik embriyo rejenerasyonu	[29]
<i>Lilium longiflorum</i>	In vitro pseudo-bulbletler	tTCL	0.5-0.7, 0.8-1.0, 1.2-1.5 mm kalınlık	Doğrudan somatik embriyo rejenerasyonu ve devamında sürgün rejenerasyonu	[30]
<i>Malaxis wallichii</i>	In vitro sürgünlerden elde edilen bir veya iki nodlu pseudo segmentler	tTCL	0.3-0.5 mm kalınlık	Doğrudan in vitro sürgün rejenerasyonu	[31]
<i>Oryza sativa</i> L.	In vitro fideciklerden elde edilen sürgün apikal meristemleri	tTCL	0.2-0.4 mm kalınlık	Doğrudan somatik embriyo rejenerasyonu ve devamında sürgün rejenerasyonu	[32]
<i>Phalaenopsis amabilis</i> cv. Jinan	In vitro sürgünlerden elde edilen yaprak ve çiçek sapı nodu	ITCL-tTCL	<b>Çiçek sapı nodu (tTCL):</b> 0.5 mm kalınlık <b>Yaprak (ITCL):</b> 0.5 mm uzunluk	Doğrudan somatik embriyo rejenerasyonu ve devamında sürgün rejenerasyonu	[33]
<i>Phaseolus vulgaris</i> L. cv. Carioca	In vitro fideciklerden elde edilen epikotil, hipokotil, kotiledonlar, kökler	tTCL	0.3-0.5 mm kalınlık	Doğrudan in vitro sürgün rejenerasyonu	[34]
<i>Pinus patula</i> Schl. et Cham	Olgunlaşmamış zigotik embriyolar	tTCL-ITCL	0.3-0.5 mm kalınlık	Embriyogenik kallus rejenerasyonu	[35]
<i>Rubus sanctus</i> <i>Rubus hirtus</i>	In vitro sürgünlerden elde edilen gövdeler	tTCL	0.5-0.8 mm	Dolaylı somatik embriyo rejenerasyonu	[6]
<i>Scutellaria ocmulgee</i>	In vitro sürgünlerden elde edilen yapraklar ve internodlar	tTCL	<b>Yaprak:</b> 1225.50 µm uzunluk ve 107.65 µm kalınlık <b>İnternod:</b> 105 µm kalınlık ve 101 µm çap	Dolaylı in vitro sürgün rejenerasyonu	[36]
<i>Sesamum indicum</i> L. cv. Dhavari	In vitro fideciklerden elde edilen kök ve internodlar	tTCL	0.5- 2.5 mm kalınlık	Doğrudan in vitro sürgün rejenerasyonu	[37]
<i>Spilanthes acmella</i> L.	Ex vitro koşullarda yetiştirilen bitkilerin nodal segmentleri	tTCL	1-4 mm kalınlık	Doğrudan in vitro sürgün rejenerasyonu	[38]
<i>Stevia rebaudiana</i> Bertoni	Hipokotil	tTCL	0.3-0.5 mm kalınlık	Doğrudan in vitro sürgün rejenerasyonu	[39]
<i>Talinum triangulare</i> (Jacq.) Willd.	Ex vitro bitkilerden elde edilen internodlar	tTCL	3-5 mm uzunluğunda	Dolaylı in vitro sürgün rejenerasyonu	[40]
<i>Urginea altissima</i> (L.f.) Baker	Ex vitro koşullarda yetiştirilen bitkilerden elde edilen yapraklar	ITCL	10 mm uzunluk ve 2 mm genişlik	Doğrudan in vitro sürgün rejenerasyonu	[41]
<i>Vigna unguiculata</i> L. Walp	In vitro fideciklerden elde edilen kotiledon nodları	tTCL- ITCL	<b>ITCL:</b> 0.5 mm kalınlık 1 cm uzunluk <b>tTCL:</b> 0.3-0.5 mm kalınlık	Doğrudan in vitro bitkicik rejenerasyonu	[42]
<i>Pistacia lentiscus</i> var. Chia	Ex vitro koşullarda yetiştirilen yaprak, nod ve gövde kısımları	tTCL- ITCL	0.5-1 mm kalınlığında	Kallus rejenerasyonu	[49]

kileri (*Citrus* spp. ve elma). Fakat; buğday veya patates gibi temel mahsuller için veya daha geniş bir tıbbi ve farmasötik açıdan önemli türlerin yelpazesi için ve hatta sandal ağacı gibi nesli tükenmekte olan diğer odunsu ağaç türleri için TCL sistemine ait uygulamaların olmaması, bu tekniğin

potansiyelinin büyük ölçüde araştırılmadığının bir göstergesidir [2, 8].

### 3 İnce hücre tabaka kültür sisteminin avantajları ve dezavantajları

**Avantajları:** TCL eksplantları geleneksel eksplantlara göre pek çok avantaj sağlamaktadır:

- TCL eksplantları kullanıldıklarında; geleneksel eksplantlara göre daha yüksek bir organogenik veya embriyogenik yanıtlar elde edilebilmektedir [1]. TCL tekniği ile yüksek frekanslı organ rejenerasyonu sağlanabildiği gibi, istenen organın üretilmesi için gereken zaman aralığının azaltılması da mümkündür. Geleneksel eksplantlardan biri olan sürgün ucu eksplantı kullanılarak yılda 11.000 bitkicik üretilirken; tek bir enine TCL'den 80.000'den fazla bitkicik üretilbileceği belirlenmiştir [43].
- TCL tekniğinde besin ortamı ile temas halinde olan eksplantın yüzey alanı, geleneksel bir eksplantından daha büyüktür ve bu yüzden ortam bileşenlerinin taşınması daha verimli olmaktadır; böylelikle bu ortam bileşenleri, eksplantların alıcı hücrelerine nispeten daha fazla ulaşabilmektedir. Bu sebeple TCL eksplantlarında daha yüksek oranda ve hızlı şekilde *in vitro* büyüme ve morfogenez gözlemlenmektedir [1].
- *In vitro* başlangıç kültürlerinin kurulmasında veya altkültürlemeler sırasında bitki materyalinin mevcudiyeti sınırlıysa, eksplant olarak TCL'lerin kullanılması fayda sağlamaktadır [1].
- Olgun dokular *in vitro* olarak inatçı (rekalsitrant) olma eğiliminde olduklarından; genellikle mikroçoğaltımı zor olan konifer ve orman ağacı türlerinde genç dokulardan alınan TCL eksplantları daha iyi bir rejenerasyon fırsatı sunmaktadırlar [1].
- TCL kültür sistemi kimerizm olasılığını önemli ölçüde azaltmaktadır [44].
- Mikroçoğaltımı problemlili olan birçok süs bitkisinin çoğaltımı için TCL teknolojisi avantajlı bir şekilde kullanılabilmektedir [17].
- Bitki biyoteknolojisi ile ilgili yapılan araştırmalarda, gelişim süreçlerinin altında yatan genetik ve biyokimyasal soruları mümkün olan en basit şekilde cevaplayabilecek teknikler sürekli olarak araştırılmaktadır. TCL kültür sistemi, genetik çalışmalar için gerekli altyapıyı sunmaktadır [5]. TCL'ler genetik mühendisliğinin yanı sıra, *in vitro* çiçeklenmede, standartlaştırılmış sekonder metabolit üretimi için kültürlerin oluşturulmasında ve ayrıca genetik, farklılaşma ve biyokimyasal olayların incelenmesinde de kullanılmaktadır [12].
- Transgen ekspresyonu, *in vitro* çiçeklenme ve morfogenez gibi süreçleri kontrol eden mekanizmaların anlaşılmasını mümkün kılan TCL sistemleri, belirli fizyolojik ve genetik yolları ve süreçleri daha fazla aydınlatabilecek yeni araştırmaların yolunu açmaktadır [3].
- Morfoanatomik değişiklikler ve morfogenez üzerine yapılan çalışmalarda, TCL'lerin kullanımı daha faydalıdır; çünkü ışık veya elektron mikroskobu için TCL eksplantlarından örneklerin hazırlanması geleneksel eksplantlara kıyasla çok daha kolaydır [1].

- *A. thaliana*'daki rizogenez çalışmalarında adventif köklenme mekanizmasını anlamak için TCL sisteminin kullanımı, bu sistemin bitki gelişim biyolojisindeki temel araştırmalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır [1].
- Genetik transformasyonda, TCL bazlı rejenerasyon sistemlerinin kullanılması, daha büyük bir yüzey alanının enfekte olmasına izin verdiği için oldukça avantajlıdır [1].
- TCL'ler, anterleri veya stigmaları herhangi bir zamanda kullanılabilir hale getirmek üzere *in vitro* çiçeklerin üretimi gibi yüksek düzeyde uzmanlaşma gerektiren araştırmalar için belirli organların gerekli olabileceği, ancak doğal koşullar altında belirli mevsimlerle ciddi şekilde sınırlı olacağı durumlar için özel bir değere sahiptirler [8].
- Çevresel faktörlere karşı daha yüksek hassasiyetleri nedeniyle, TCL'ler *in vitro* seleksiyon çalışmalarında da başarıyla kullanılmaktadır [1].

**Dezavantajları:** TCL eksplantları bisturi yardımı ile kesilerek hazırlandığı için stabil bir boyutta kesilmesi zordur. Bu işlemin zor olması sebebi ile TCL tekniğinin geniş bitki türleri yelpazesinde kullanımı kısıtlı kalmaktadır. Genetik transformasyon çalışmalarında TCL sisteminin kullanılması, daha büyük bir yüzey alanının enfekte olmasına izin verebilecektir, ancak, *Agrobacterium*'un uzaklaştırılmasında veya aşırı bakteri üretiminin ve eksplant kontaminasyonunun önlenmesinde zorlukların oluşmasına yol açabilir [1].

#### 4 İnce hücre tabaka eksplantlarının rejenerasyon kapasitelerini etkileyen faktörler

Eksplant, bitki doku kültürlerinde en önemli biyotik faktördür [14]. Herhangi bir bitki türünün doku kültürü, büyük ölçekli mikroçoğaltımı ve ayrıca genetik transformasyonuna yönelik başarısının altında yatan temel faktör rejenerasyondur [7]. TCL eksplantları, besin ortamı ve çevresel koşullar gibi diğer kontrol edilebilir faktörlerle birlikte boyutlarının ve kökenlerinin bir sonucu olarak geleneksel eksplantlara göre daha yüksek rejenerasyon kapasitesine sahiptir [7, 14]. TCL teknolojisi ile, bir eksplantın morfogenetik (kallogenik, kaulogenik, rizogenik, somatik embriyogenik ve floral) yolları kontrollü ve tekrarlanabilir bir şekilde manipüle edilebilmektedir [7].

TCL eksplantlarının rejenerasyon kapasitelerini etkileyen bazı faktörler mevcuttur. Bunlardan birincisi ana bitki ve orijin etkisidir [7]. Genotip (tür ve çeşit), hazırlandığı doku veya organ, ana doku veya organın yaşı, boyutu ve şekli dahil olmak üzere bir dizi biyotik faktörün tümü, doku kültüründeki başarıyı etkilemektedir [2]. TCL eksplantlarında morfogenetik kapasite bakımından en büyük fark, kaynağın vejetatif veya floral olup olmamasından kaynaklanmaktadır. TCL eksplantlarında başarıyı etkileyen bir diğer faktör bitkinin gelişim evresidir. TCL eksplantlarının morfogenetik kapasitesi için ana bitkinin hangi fizyolojik aşamada olduğu çok önemlidir. Tran Thanh Van [46] 3 farklı gelişim evresindeki floral sürgünlerin rejenerasyon potansiyellerini test etmiştir. Çalışmada tamamen açmış çiçek aşaması, yeşil meyve aşaması ve

olgunlaşmış meyve aşaması denenmiş; en başarılı sonuç yeşil meyve aşamasındaki floral sürgünlerden elde edilmiştir. Ayrıca her çiçek dalının apikal ve bazal kısımlarından alınan eksplantlar da incelendiğinde, bazal kısımdan alınan eksplantların daha yüksek floral sürgün oluşturma oranına sahip olduğu gözlenmiştir [7].

Eksplant boyutu bir diğer önemli faktördür. Gendy vd. [47]'nin yaptıkları bir çalışmada, eksplant boyutu azaldıkça eksplantların kallus oluşturma yüzdelerinin arttığı belirlenmiştir. Nhut vd. [48]'nin yaptıkları bir çalışmada ise *Lilium longiflorum*'da 0.5, 1, 2 ve 3 mm kalınlığında farklı tTCL boyutları test edilmiştir. 60 günün sonunda 0.5 mm kalınlığındaki tTCL eksplantlarının %90'ında nekroz meydana gelirken; 1, 2 ve 3 mm kalınlığındaki tTCL'lerde ise %100'lük bir hayatta kalma oranıyla en fazla sürgün ve bitki elde edilmiştir [7].

Bir diğer faktör ise eksplantın ortama uyum sağlayıp sağlayamadığı ile ilgilidir [7]. Biyotik faktörlerin yanı sıra eksplantların kültüre alındıkları besin ortamları ve maruz bırakıldıkları kontrollü çevre koşulları da eksplantın totipotensisini (herhangi bir bitki hücresinden bütün bir bitkiyi yeniden üretme yeteneği) ve/veya multipotensisini (herhangi bir bitki hücresinden herhangi bir organı yeniden üretme yeteneği) etkilemektedir [14].

## 5 Bitki doku kültüründe rejenerasyon kapasitesini etkileyen iki faktör: büyüme düzeltme faktörü ve geometrik faktör

Bitki doku kültüründe bir bitkinin rejenerasyon potansiyelinin çalışmadan çalışmaya farklılık göstermesinin iki olası nedeni vardır. Birincisi; tüm varlıklar eşit doğmazlar. İkincisi ise tüm eksplantlar aynı rejenerasyon kapasitesine sahip değildirler. Bir bitki doku kültürü çalışmasında eksplantın organogenik sonucunu çok sayıda faktör etkileyebilmektedir. Ancak üretim, verim ve organogenik çıktıdaki farklılıkların tümü tek bir faktörle ölçülmektedir: eksplant boyutu [45].

TCL, birkaç mm kalınlığında; ancak değişken uzunluk ve çap oranlarına sahip ince bir hücre katmanıdır [14]. Bir TCL'nin *in vitro* gelişimsel başarısının sırrı, yalnızca enine veya uzunlamasına kesilerek dahil edilebilen doku tiplerine değil, aynı zamanda eksplantın alanına ve hacmine de bağlıdır [8]. Bir TCL eksplantını geleneksel bir eksplanttan ayıran en önemli faktörler; yüzey-hacim oranı, boyutu ve kalınlığıdır (Şekil 1) [14]. TCL eksplantlarının görünüşte, morfogenez üretkenlikleri geleneksel eksplantlardan daha düşüktür; ancak **büyüme düzeltme faktörü** (growth correction factor: GCF) ve **geometrik faktör** (geometric factor: GF) kavramları göz önünde bulundurulduğunda TCL eksplantlarının gerçek (potansiyel) üretkenlikleri geleneksel bir eksplantınkinden kat kat fazladır. Bu sebeple de, yaklaşık 45 yıldan fazladır TCL'ler başta süs bitkileri ve orkideler olmak üzere tarla ve sebze bitkileri, ayrıca tıbbi bitkilere de uygulanmaktadır [2].

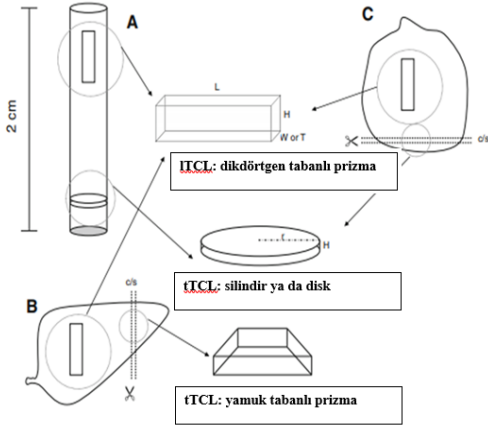
Bir eksplantın rejenerasyon kapasitesini (yani morfogenez veya organogenik potansiyelini) ölçülebilmek veya karşılaştırabilmek için iki yaklaşım mümkündür. İlki, bir eksplant tipinin rejenerasyon kapasitesini bir başka eksplantın rejenerasyon kapasitesi ile karşılaştırmaktır

(örneğin geleneksel bir eksplant ile bir tTCL veya bir ITCL'nin karşılaştırılması). Bu yaklaşım ile kültüre alınan eksplant başına rejenera olan sürgün sayısı karşılaştırılmış olunur. İkinci yaklaşım da ise kaynak organın (veya dokunun) veriminin farklı organ tipleri kullanılarak organ bazında ele alınmasıdır. Örneğin, bir organdan (yapraktan, taç yapraktan, protokorm benzeri yapıdan vb.) rejenera olan sürgünlerin sayısının karşılaştırılması. Birinci yaklaşımda eksplant verimi dikkate alınırken; ikinci yaklaşımda ise kaynak organın verimi dikkate alınmaktadır. Bir bitki doku kültürü denemesinde, araştırmacı hem rejenera organ(lar)ı oluşturan eksplantların yüzdesini hem de rejenera olan eksplant başına organ(lar)ın sayısını belirleyebilir. Bu durum, 'başarılı' rejenerasyon için iki bileşenin olduğu ve her iki yaklaşımın da doğru bir karşılaştırma seviyesi olduğu anlamına gelmektedir [14].

**Büyüme düzeltme faktörü** (GCF), iki eksplantın karşılaştırılmasında bir kaynak organdan kaç kat daha fazla hedef organın rejenera olabileceğini ifade eden orantılı bir sayıdır. GCF, herhangi bir bitki kaynak organ ya da dokusundan (örneğin yaprak, protokorm benzeri yapı-PLB, gövde, kök, apikal meristem vb.) türevlenen herhangi bir eksplantın rejenerasyon kapasitesinin doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesine izin veren yeni bir kavramdır. Aynı kültür koşulları ve deneysel prosedürlerin takip edilmesi koşulu ile, GCF; teorik olarak bir bilim insanının bir cins, tür veya çeşidin gerçek rejenerasyon kapasitesinin diğer protokollerle ve literatürde yayınlanmış olanlarla karşılaştırılmasını mümkün kılar. Genellikle protokol, eksplant boyutu ve hazırlığını içermektedir. Teoride her bir tür ya da çeşidin kendi rejenerasyon kapasitesi vardır. Çünkü eksplant tipi, konumu, yaşı, boyutu, bazal ortam, bitki büyüme düzenleyicileri, sakaroz, ışık, sıcaklık gibi birçok faktör rejenerasyon kapasitesini etkiler. Ancak iki eksplantın rejenerasyon kapasitesini karşılaştırırken eksplantların boyutu ve şekli çok önemlidir. Eksplantın rejenerasyon kapasitesinin eksplant boyutuna ve şekline bağlı olduğu; eksplant yüzeyine ve hacmine dayalı olarak da hesaplanabilen bir bileşeni vardır. Bu bileşen, **geometrik faktör** (GF) olarak tanımlanmaktadır. GF, herhangi bir *in vitro* koşuldaki bağımsızdır; sadece eksplant boyutuna, şekline ve rejenerasyon yapabilen dokuya bağlıdır [14].

Özellikle kaynak organ başına rejenera olan organların sayısı değerlendirilirken, TCL'ler gerçek rejenerasyon potansiyelleri açısından geleneksel bir eksplanttan daha üretkendir. Bu durum, GCF ve GF'nin uygulandığı üç bitki türünde (*Cymbidium* hibridi, krizantem ve elma) gösterilmiştir. GCF ve GF uygulanan bu türlerde, TCL eksplantlarının nispi üretkenliğinin, geleneksel eksplantlarınkinden 10 kat ile 13 kat arasında daha yüksek olduğu belirlenmiştir [1]. Eksplant boyutu, şekli ve hacmi hesaba katıldığında, TCL'nin üretkenliğinin geleneksel bir eksplanttan yüksek olmasının sebebi; TCL eksplantlarının kısmen daha yüksek morfogenez hücre oranına sahip olmasından ve ortam bileşenlerinin hücrelere daha kolay taşınabilmesinden kaynaklanmaktadır [8]. GCF ve GF kavramları göz önünde bulundurulduğunda; TCL'lerin gerçek veya gözlemlenen üretkenliğinin daha düşük görüldüğü durumlarda bile, geleneksel eksplantlara kıyasla

TCL'lerin daha fazla üretken oldukları belirlenmiştir [2]. Örneğin bir çalışmada X eksplantını kullanan bilim insanının 50 adet sürgün rejenerasyonu; Y eksplantını kullanan bilim insanının ise 100 adet sürgün rejenerasyonu elde ettiğini varsayalım. Y eksplantını kullanan bilim insanı, çalışmasında kullandığı protokolünün X eksplantını kullanan bilim insanının çalışmasından daha başarılı olduğunu öne sürer. Fakat bu her durumda doğru değildir. X eksplantını kullanan bilim insanı 1 mm uzunluğundaki eksplantı kullanırken, Y eksplantını kullanan bilim insanı 1 cm uzunluğunda eksplant kullandıysa bu demek oluyor ki Y eksplantı X eksplantından 10 kat büyüktür. Yani bir Y eksplantından 10 tane X eksplantı çıkarılabilir. Bu noktada eksplantların yüzey alanları dikkate alındığında; X eksplantını kullanan bilim insanının protokolü aslında Y eksplantını kullanan bilim insanının protokolüne göre verim açısından daha yüksek bir sonuç vermektedir [45].



**Şekil 1.** Enine ince hücre tabakası (tTCL) veya uzunlamasına ince hücre tabakasının (ITCL) hemen hemen her eksplant kaynağından nasıl üretilebileceğinin şematik diyagramı.

A: Herhangi bir monokotiledon veya dikotiledon bitkiden elde edilen gövde internod dokusu, çiçek sapları (pedisel/ pedikül), kökler ve apikal meristematik alanları içeren tipik kaynaklar.

B: Herhangi bir monokotiledon veya dikotiledon bitkiden elde edilen yapraklar, taç yaprakları (petal) ve çanak yaprakları (sepal) içeren tipik kaynaklar.

C: Orkideler, soğanimsı yumrular (korm), küçük soğanimsı yumrular (kormlet), yumrular (tuber) veya soğanlarda (bulb) bulunan protokorm benzeri yapılar veya yumurtalık (ovaryum) gibi yuvarlak veya kubbe benzeri organları içeren tipik kaynaklar.

A, B ve C için, ITCL eksplantı herhangi bir organın yüzeyinden (yalnızca epidermal ve subepidermal tabakalar) hazırlanırken; tTCL'de ise eksplant herhangi bir organın enine kesitiyle birkaç farklı hücre/doku tabaka tipini içerecek şekilde hazırlanır.

H: yükseklik, L: uzunluk, W veya T: genişlik veya kalınlık, r: yarıçap, c/s: doku boyunca enine kesit. Makas kesme çizgisi: enine kesit (c/s) elde etmek için eksplant üzerinde kesilecek bölgeyi göstermektedir. Küboid: Dikdörtgen tabanlı prizma; Trapezoid: Yamuk tabanlı prizma [14]

Bir başka örnek verecek olursak; bir yaprak kaynağından 2 adet geleneksel eksplant, 50 adet de TCL eksplantı elde edildiği varsayılırsa, kullanılan eksplant sayısı da dikkate alınarak **verim değerleri**, **Denklem 1** ve **Denklem 2**'deki gibi hesaplanmaktadır [45].

Geleneksel eksplant için verim değeri:

$$2 * (\%R_{conv} * SN_{conv})/100 \quad (1)$$

TCL eksplantı için verim değeri:

$$50 * (\%R_{tTCL} * SN_{tTCL})/100 \quad (2)$$

(%R<sub>conv</sub>: Geleneksel bir eksplanttan rejeneren olan sürgünlerin yüzdesi; %R<sub>tTCL</sub>: tTCL eksplantından rejeneren olan sürgünlerin yüzdesi; SN<sub>conv</sub>: Geleneksel eksplant başına rejeneren olan sürgün sayısı; SN<sub>tTCL</sub>: tTCL eksplantı başına rejeneren olan sürgün sayısı)

GF, GCF ile **Denklem 3**'de gösterildiği gibi orantılı olmalıdır. GF ve GCF arasındaki bağlantı, farklı eksplant tiplerinin rejenerasyon yüzdesidir, ancak hazırlanabilecek eksplant sayısı arasındaki farkı da dikkate almaktadır. GF ve GCF arasındaki orantılı faktör (k); besin ortamı, aydınlatma, genotip, eksplant yaşı, örnekleme zamanı ve benzeri gibi rejenerasyon işleminin başarısını etkileyen diğer *in vitro* deneysel koşullara bağlıyken, eksplant büyüklüğü ve şekline bağlı değildir. Yalnızca tek bir faktör farklı ise (örneğin; bitki türü) k basitçe hesaplanır. Bununla birlikte, bir deneyde daha fazla faktör değişirse, yeni k değeri rejenerasyonun sonucunu etkileyen bu faktörlerden etkilenecektir. Başka bir deyişle, k yalnızca deneysel bir faktöre veya bitki büyüme düzenleyicileri, ışık yoğunluğu veya sıcaklık gibi bir faktördeki değişikliğe yanıt olarak deneysel şekilde belirlenebilmektedir. Yani, sadece eksplant boyutu ve şekli farklı olduğunda aynı deneysel koşullar altında (bazal ortam, bitki büyüme düzenleyicileri, sakaroz, ışık şiddeti, sıcaklık vb.) iki eksplantın karşılaştırılması durumunda k aynıdır [14].

$$GCF = k * GF * \frac{n * \%R_{tTCL}}{n * \%R_{conv}} \quad (3)$$

(GCF: Büyüme düzeltme faktörü; n: bir kaynak eksplantından teorik olarak hazırlanabilecek TCL sayısı; R: Rejenerasyon kapasitesi; %R<sub>tTCL</sub>: tTCL eksplantının rejenerasyon kapasitesi yüzdesi; %R<sub>conv</sub>: geleneksel eksplantın rejenerasyon kapasitesi yüzdesi; k: ortam, aydınlatma, genotip, eksplant yaşı, örnekleme zamanı vb. deneysel koşullar; GF: Geometrik faktör) [14].

Teoriye göre, her bir kültür çeşidinin her bir eksplant tipi için kendine ait bir GCF'si vardır; çünkü eksplant tipi, konumu, yaşı, boyutunun yanı sıra besin ortamı, bitki büyüme düzenleyicileri, sükröz, ışık, sıcaklık gibi diğer birçok faktör de rejenerasyon kapasitesini etkilemektedir. Bununla birlikte, iki eksplantın rejenerasyon kapasitesini karşılaştırsak, boyutları ve şekilleri çok önemli parametrelerdir. GF ve GCF; eksplant boyutunun bilinmesi koşuluyla, farklı laboratuvarlarda *in vitro* bitki çalışmalarının doğrudan karşılaştırılmasını ve farklı eksplantlar kullanılacaksa bir rejenerasyon protokolünün teorik sonucunun tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır. GF, yalnızca karşılaştırmak istediğimiz iki eksplantın şekline ve boyutuna bağlı olan sabit bir faktör olduğundan, farklı bitkilerden gelen aynı eksplantlar, aynı boyut ve şekle sahip olmaları koşuluyla ve eğer aynı doku tipi/tyiplerinden rejenerasyon meydana geldiyse doğrudan karşılaştırılabilirler. GCF ise besin ortamı, aydınlatma vb.



gibi diğer tüm deneysel faktörlerin aynı olması koşuluyla aynı bitkiden farklı eksplantların karşılaştırılmasına veya aynı eksplant türleri için farklı protokollerin karşılaştırılmasına izin vermektedir [14].

GCF ve GF kavramlarını birkaç örnek üzerinden inceleyelim. İlk olarak bir denemede 9 tane *Cymbidium* çeşidi kullanılmıştır. *Cymbidium* bitkisinde organogenez epidermal veya subepidermal hücrelerden meydana gelirken; mezofil hücrelerinden ise meydana gelmemiştir. Bu nedenle; bu denemede bitkinin tüm yüzey alanı değil, yalnızca bir eksplantın epidermal yüzey alanının ve epidermal hacminin rejenerasyon kapasitesini etkilediği göz önünde bulundurulmuştur. Bu çalışmada tTCL ve ITCL eksplantları geleneksel eksplanttan hazırlanmıştır. Geleneksel eksplant olarak yarım küre şeklindeki protokorm benzeri yapı (PLB) kullanılmıştır. tTCL eksplantı silindirik şekilde; ITCL eksplantı ise dikdörtgen tabanlı prizma şeklinde kesilmiştir. Geleneksel eksplant ve TCL eksplantları başına gelişen PLB sayısını karşılaştırırken aşağıdaki Denklem 4 ve Denklem 5 kullanılmaktadır. Bu iki denklemi incelediğimiz zaman, geometrik faktörün hem TCL eksplantlarından hem de geleneksel eksplanttan elde edilen PLB sayısı ile doğru orantılı olduğu görülmektedir [14].

$$PLB_{tTCL} = GF * k * PLB_{conv} \quad (4)$$

$$PLB_{ITCL} = GF * k * PLB_{conv} \quad (5)$$

( $PLB_{tTCL}$ : tTCL eksplantı başına gelişen PLB sayısı;  $PLB_{ITCL}$ : ITCL eksplantı başına gelişen PLB sayısı;  $PLB_{conv}$ : geleneksel eksplant başına gelişen PLB sayısı; GF: geometrik faktör; k: ortam, aydınlatma, genotip, eksplant yaşı, örnekleme zamanı vb. deneysel koşullar)

Silindirik şeklindeki tTCL eksplantının geometrik faktörü hesaplanırken Denklem 6 kullanılır. Denklemde silindirik şeklinde olan tTCL eksplantının alanı, hacmi ve yarım küre şeklinde geleneksel PLB eksplantının alanı, hacmi hesaba katıldığında Denklem 6a elde edilir [14].

$$GF_{tTCL} = \frac{A_{tTCL}}{\frac{V_{tTCL}}{A_{conv}}} \quad (6)$$

$$GF_{tTCL} = \frac{\frac{2 * \pi * r_{tTCL} * h}{\pi * r_{tTCL}^2 * h}}{\frac{2 * \pi * r_{conv}^2}{\frac{2}{3} * \pi * r_{conv}^3}} \quad (6a)$$

( $GF_{tTCL}$ : tTCL eksplantının geometrik faktörü;  $A_{tTCL}$ : tTCL eksplantının alanı;  $V_{tTCL}$ : tTCL eksplantının hacmi;  $A_{conv}$ : Geleneksel eksplantın alanı;  $V_{conv}$ : geleneksel eksplantın hacmi;  $r_{tTCL}$ : tTCL eksplantının yarıçapı;  $r_{conv}$ : geleneksel eksplantın yarıçapı; h: yükseklik)

9 farklı *Cymbidium* çeşidinin kullanıldığı aynı denemede tTCL eksplantı oluşturmak için geleneksel eksplantın sadece merkezi kısmının kullanıldığı bilindiği için tTCL eksplantının ve geleneksel eksplantın yarıçapları eşittir

( $r_{tTCL}=r_{conv}$ ). Denklem 6a'da sadeleştirme işlemleri yapıldığında  $GF_{tTCL}$  değerinin 2/3 olduğu bulunur. Geleneksel eksplant yarım küre şeklindeyse, tTCL eksplantı silindirik şeklinde kesilmişse ve tTCL eksplantını oluşturmak için geleneksel eksplantın sadece merkezi kısmı kullanılmışsa GF değeri her zaman 2/3 çıkar [14].

GCF değerini hesaplamak için Denklem 3 kullanıldığında aşağıdaki şekilde Denklem 3a elde edilir. n değeri bu deney için 1 olarak alınır ve GF değeri de 2/3 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Denklem 3a'da yerine konulduğunda Denklem 3b elde edilir. Bu örnekte sadece *Cymbidium* çeşitlerinin farklı olduğu bilindiğine göre denklemdeki k değeri sadece çeşite bağlı olarak değişen bir değişkendir. tTCL eksplantı başına gelişen PLB sayısı ve yüzdesinin bilinmesi durumunda GCF ve k değerleri sayısal olarak hesaplanabilir [14].

$$\frac{PLB_{tTCL}}{PLB_{conv}} = GCF \frac{\%PLB_{conv}}{n * \%PLB_{tTCL}} = k * GF \quad (3a)$$

$$\frac{PLB_{tTCL}}{PLB_{conv}} = GCF \frac{\%PLB_{conv}}{\%PLB_{tTCL}} = k * 2/3 \quad (3b)$$

( $PLB_{tTCL}$ : tTCL eksplantlarından elde edilen PLB sayısı;  $PLB_{conv}$ : geleneksel eksplanttan gelişen PLB sayısı; GCF: büyüme düzeltme faktörü;  $\%PLB_{conv}$ : geleneksel eksplanttan elde edilen PLB yüzdesi;  $\%PLB_{tTCL}$ : tTCL eksplantlarından elde edilen PLB yüzdesi; n: geleneksel bir eksplanttan oluşturulabilecek TCL eksplantı sayısı; GF: geometrik faktör; k: ortam, aydınlatma, genotip, eksplant yaşı, örnekleme zamanı vb. deneysel koşullar)

Dikdörtgen tabanlı prizma şeklindeki ITCL eksplantının GF değeri hesaplanırken Denklem 7 kullanılır. Denklemde dikdörtgen tabanlı prizma şeklinde olan ITCL eksplantının alanı, hacmi ve yarım küre şeklinde geleneksel PLB eksplantının alanı, hacmi hesaba katıldığında Denklem 7a elde edilir. Bu denklemde GF değerinin ITCL eksplantlarının kalınlığına ve geleneksel eksplantın yarıçapına bağlı olduğu belirlenmiş olur. Geleneksel eksplant yarım küre şeklindeyse, ITCL eksplantı dikdörtgen tabanlı prizma şeklinde kesilmişse ve rejenerasyon sadece epidermisten meydana geldiğinde ITCL eksplantı için GF değeri her zaman Denklem 7a'daki gibi çıkar [14].

$$GF_{ITCL} = \frac{A_{ITCL}}{\frac{A_{conv}}{V_{conv}}} \quad (7)$$

$$GF_{ITCL} = \frac{\frac{l * w}{l * w * h_{ITCL}}}{\frac{2 * \pi * r_{conv}^2}{\frac{2}{3} * \pi * r_{conv}^3}} = \frac{r_{conv}}{3 * h_{ITCL}} \quad (7a)$$

( $GF_{ITCL}$ : ITCL eksplantının geometrik faktörü;  $A_{ITCL}$ : ITCL eksplantının alanı;  $V_{ITCL}$ : ITCL eksplantının hacmi;  $A_{conv}$ : geleneksel eksplantın alanı;  $V_{conv}$ : geleneksel eksplantın hacmi; l: uzunluk; w: kalınlık;  $h_{ITCL}$ : ITCL eksplantının yüksekliği;  $r_{conv}$ : geleneksel eksplantın yarıçapı)

GCF değerini hesaplamak için **Denklem 3** kullanıldığında **Denklem 3c** elde edilir. **Denklem 3c**'de yukarıda hesaplanan GF değeri yerine yazıldığında ve iki eksplant tipi için de PLB oluşma yüzdesi %100 olarak alındığında **Denklem 3d** elde edilir [14].

$$\frac{PLB_{ITCL}}{PLB_{conv}} = GCF \frac{\%PLB_{conv}}{n * \%PLB_{ITCL}} = k * GF \quad (3c)$$

$$\frac{GCF}{n} = k * \frac{r_{conv}}{3 * h_{ITCL}} \quad (3d)$$

( $PLB_{ITCL}$ : ITCL eksplantından gelişen PLB sayısı;  $PLB_{conv}$ : geleneksel eksplanttan gelişen PLB sayısı; GCF: büyüme düzeltme faktörü;  $\%PLB_{conv}$ : geleneksel eksplanttan gelişen PLB yüzdesi;  $\%PLB_{ITCL}$ : ITCL eksplantından gelişen PLB yüzdesi; GF: geometrik faktör; k: ortam, aydınlatma, genotip, eksplant yaşı, örnekleme zamanı vb. deneysel koşullar; n: geleneksel eksplanttan elde edilen TCL eksplantı sayısı;  $r_{conv}$ : geleneksel eksplantın yarıçapı;  $h_{ITCL}$ : ITCL eksplantının yüksekliği)

İkinci örnek olarak *Chrysanthemum* bitkisi kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışma ele alındığında, *Chrysanthemum* bitkisinde de *Cymbidium* bitkisinde olduğu gibi organogenez; epidermal ve subepidermal hücrelerden meydana gelirken, mezofil hücrelerinden ise meydana gelmemektedir. Bu nedenle bir önceki örnekte olduğu gibi eksplantın epidermal yüzey alanı rejenerasyon kapasitesini etkilemektedir. Bu çalışmada tTCL ve ITCL eksplantları geleneksel internod eksplantlarından hazırlanmıştır. Geleneksel internod eksplantı yarım silindirik şeklinde, tTCL eksplantı silindirik şeklinde ve ITCL eksplantı ise dikdörtgen tabanlı prizma şeklindedir [14].

Silindirik şeklindeki tTCL eksplantının geometrik faktörü hesaplanırken **Denklem 6** kullanılır. Denklemde silindirik şeklinde olan tTCL eksplantının alanı, hacmi ve yarım silindirik şeklindeki geleneksel internod eksplantının alanı, hacmi hesaba katıldığında **Denklem 6b** elde edilir. Geleneksel eksplantın sadece merkezi kısmı kullanıldığında geleneksel eksplantın yarıçapı ve tTCL eksplantının yarıçapı eşit olduğu için **Denklem 6b**'de gerekli sadeleştirmeler yapıldığında GF değeri 1 çıkar. Bu yüzden GF değerinin hesaplanması için **Denklem 8** kullanılır. **Denklem 8** incelendiğinde GF'nin her iki eksplantın da uzunluğuna bağlı olduğu belirlenmiş olur. Geleneksel eksplant yarım silindirik şeklinde olduğunda, tTCL eksplantı bu yarım silindirik şeklindeki geleneksel eksplantla aynı yarıçapta kesilmiş bir silindirik şeklinde olduğunda ve rejenerasyon sadece epidermal ve subepidermal hücrelerden gerçekleştiğinde **Denklem 8**'de elde edilen GF değeri her zaman doğru olur [14].

$$GF_{tTCL} = \frac{\frac{2 * \pi * h_{tTCL}}{\pi * r^2 * h_{tTCL}}}{\frac{2 * \pi * r * h_{conv}}{\pi * r^2 * h_{conv}}} = \frac{\frac{2}{r}}{\frac{2}{r}} = 1 \quad (6b)$$

$$GF_{tTCL} = \frac{A_{tTCL}}{A_{conv}} = \frac{2 * h_{tTCL}}{h_{conv}} \quad (8)$$

( $GF_{tTCL}$ : tTCL eksplantının geometrik faktör değeri;  $h_{tTCL}$ : tTCL eksplantının yüksekliği;  $h_{conv}$ : geleneksel eksplantın yüksekliği; r: eksplantın yarıçapı;  $A_{tTCL}$ : tTCL eksplantının alanı;  $A_{conv}$ : geleneksel eksplantın alanı)

Dikdörtgen tabanlı prizma şeklindeki ITCL eksplantının GF değeri hesaplanırken **Denklem 7** kullanılır. Denklemde dikdörtgen tabanlı prizma şeklinde olan ITCL eksplantının alanı, hacmi ve yarım silindirik şeklindeki geleneksel internod eksplantının alanı, hacmi hesaba katıldığında **Denklem 7b** elde edilir. **Denklem 7b** incelendiğinde GF değerinin geleneksel eksplantın yarıçapına ve ITCL eksplantının kalınlığına bağlı olduğu görülmektedir. ITCL eksplantı yarım silindirik şeklindeki geleneksel eksplanttan dikdörtgen tabanlı prizma şeklinde kesildiyse ve rejenerasyon sadece epidermal ve subepidermal yüzeyde gerçekleştiyse elde edilen GF değeri her zaman doğru olur [14].

$$GF_{ITCL} = \frac{\frac{l * w}{l * w * h_{ITCL}}}{\frac{\pi * r * h_{conv}}{\frac{1}{2} * \pi * r^2 * h_{conv}}} = \frac{r}{2 * h_{ITCL}} \quad (7b)$$

( $GF_{ITCL}$ : ITCL eksplantının geometrik faktörü; l: uzunluk; w: kalınlık;  $h_{ITCL}$ : ITCL eksplantının yüksekliği;  $h_{conv}$ : geleneksel eksplantın yüksekliği; r: yarıçap)

GCF değerini hesaplarırken **Denklem 3** temel alınarak **Denklem 9** kullanılır. SR% değeri her iki eksplant tipi için de %100 olduğu durumda; **Denklem 9a** elde edilir [14].

$$\frac{SN_{TCL}}{SN_{conv}} = GCF \frac{\%SR_{conv}}{n * \%SR_{TCL}} = k * GF \quad (9)$$

$$GCF = n * k * GF \quad (9a)$$

( $SN_{TCL}$ : TCL eksplantlarından elde edilen sürgün sayısı;  $SN_{conv}$ : geleneksel eksplanttan elde edilen sürgün sayısı; GCF: büyüme düzeltme faktörü;  $\%SR_{conv}$ : geleneksel eksplanttan elde edilen sürgün rejenerasyon yüzdesi;  $\%SR_{TCL}$ : TCL eksplantlarından elde edilen sürgün rejenerasyon yüzdesi; GF: geometrik faktör; k: ortam, aydınlatma, genotip, eksplant yaşı, örnekleme zamanı vb. deneysel koşullar; n: geleneksel eksplanttan elde edilen TCL eksplantı sayısı)

## 6 Sonuç

İnce ya da ultra ince eksplantları ifade eden TCL eksplantlarının geleneksel bir eksplanttan çok daha fazla oranda organ ve embriyo rejenerasyonunu (kallus, kök, sürgün, çiçek ve somatik embriyo vb.) indükleyebildiği birçok çalışmada rapor edilmiştir. TCL eksplantları 100'ü aşkın bitki türü için yararlı alternatif eksplantlar olarak kullanılmıştır. Çoğu durumda organ hedefli rejenerasyon, diğer abiyotik ortam ve kültürle ilgili koşullar optimize edildikten sonra TCL'lerin kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir. TCL tekniği az miktarda bitki materyali ve besin ortamı gerektirdiği için rejenerasyon ve transformasyonun temel ve uygulamalı yönlerinin incelenmesi açısından basitleştirilmiş bir sistem

sağlamaktadır. Bir TCL eksplantının gerçek rejenerasyon potansiyelini belirleyebilmek için büyüme düzeltme faktörü ve geometrik faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Geometrik faktör, farklı bitkilerden alınan aynı boyut ve şekile sahip eksplantların rejenerasyon potansiyellerinin karşılaştırılabilmesini mümkün kılarken; büyüme düzeltme faktörü ise tüm deneysel koşulların aynı olduğu durumda aynı bitkiden alınan farklı eksplant tiplerinin rejenerasyon kapasitelerinin karşılaştırılmasına imkan vermektedir. Bu iki kavram sayesinde farklı laboratuvarlarda çalışan insanların aynı deney sonucuna ulaşmaları mümkündür. TCL tekniğinin, yalnızca doku kültürü ve *in vitro* rejenerasyon için değil; aynı zamanda kriyoprezervasyon, *in vitro* seleksiyon, *in vitro* mutagenез ve genetik transformasyon gibi uygulamalı biyoteknolojik çalışmalarda da parlak bir geleceği olduğu açıktır.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %1

#### Kaynaklar

- [1] J. A. Teixeira da Silva and J. Dobránszki, Recent advances and novelties in the thin cell layer-based plant biotechnology – A mini-review. *Journal of Biotechnology, Computational Biology and Bionanotechnology*, 100 (1), 89–96, 2019. <https://doi.org/10.5114/bta.2019.83215>.
- [2] J. A. Teixeira da Silva and J. Dobránszki, Plant thin cell layers: update and perspectives. *Folia Horticulturae*, 27/2, 183-190, 2015. <https://doi.org/10.1515/fhort-2015-0029>.
- [3] J. A. Teixeira da Silva, Thin Cell Layer technology in ornamental plant micropropagation and biotechnology, *African Journal of Biotechnology*, 2 (12), 683-691, 2003. <https://doi.org/10.5897/AJB2003.000-1125>.
- [4] L. A. Croom, C. L. Jackson, B. N. Vaidya, P. Parajuli and N. Joshee, Thin Cell Layer (TCL) Culture System for Herbal Biomass Production and Genetic Transformation of *Bacopa monnieri* L. *Wettst. American Journal of Plant Sciences*, 7, 1232-1245, 2016. <http://dx.doi.org/10.4236/ajps.2016.78119>.
- [5] D. T. Nhut, N. T. Hai, N. T. Don, J. A. Teixeira da Silva and K. Tran Thanh Van, Latest Applications of Thin Cell Layer (TCL) Culture Systems in Plant Regeneration and Morphogenesis. in: J. A. Teixeira da Silva (Eds.), *Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology: Advances and Topical Issues (Vol 2)*, Global Science Books, pp.465-471, London, 2006.
- [6] N. Sabooni and A. Shekafandeh, Somatic embryogenesis and plant regeneration of blackberry using the thin cell layer technique, 130, 313–321, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1225-4>.
- [7] D. T. Nhut, J. A. Teixeira D Silva and C. R. Aswat, The importance of the explant on regeneration in thin cell layer technology. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 39, 266–276, 2003. <https://doi.org/10.1007/IVP2002408>.
- [8] J. Teixeira Da Silva, M. M. Altamura and J. Dobránszki, The untapped potential of plant thin cell layers. *Journal of Horticultural Research*, 23(2), 127-131, 2015. <https://doi.org/10.2478/johr-2015-0024>.
- [9] P. Bhattacharyya, P. Paul, S. Kumaria and P. Tandon, Transverse thin cell layer (t-TCL)-mediated improvised micropropagation protocol for endangered medicinal orchid *Dendrobium aphyllum* Roxb: an integrated phytomolecular approach. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40:137, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2703-y>.
- [10] S. M. Vudala, A. A. Padiyal and L. L. F. Ribas, Micropropagation of *Hadrolaelia grandis* through transverse and longitudinal thin cell layer culture. *South African Journal of Botany*, 121, 76-82, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2018.07.017>.
- [11] J. Teixeira Da Silva, Thin cell layer technology for induced response and control of rhizogenesis in chrysanthemum. *Plant Growth Regulation*, 39, 67–76, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1021854320969>.
- [12] J. A. Teixeira da Silva, Plant Thin Cell Layers: Challenging the Concept. *International Journal of Plant Developmental Biology*, 2 (1), 79-81, 2008.
- [13] J. A. Teixeira da Silva and J. Dobránszki, Plant Thin Cell Layers: A 40-Year Celebration. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32, 922–943, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9336-6>.
- [14] J. A. Teixeira da Silva and J. Dobránszki, Dissecting the Concept of the Thin Cell Layer: Theoretical Basis and Practical Application of the Plant Growth Correction Factor to Apple, *Cymbidium* and *Chrysanthemum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33, 881–895, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00344-014-9437-x>.
- [15] J. A. Teixeira Da Silva, Thin Cell Layers: Power-Tool for Organogenesis of Floricultural Crops. in: S. M. Jain and S. J. Ochatt (Eds.), *Protocols for in Vitro Propagation of Ornamental Plants, Methods in Molecular Biology*, Humana Press, a part of Springer Science+Business Media, LLC, Springer, pp. 377-397, 2010.
- [16] K. M. Monja-Mio and M. L. Robert, Direct somatic embryogenesis of *Agave fourcroydes* Lem. through thin cell layer culture. *In vitro cell and developmental biology-Plant*, 49, 541–549, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11627-013-9535-7>.
- [17] I. M. Hidayat, The use of thin cell layer (TCL) explants in micropropagation of shallot (*Allium ascalonicum* L.). VII International Symposium on Edible Alliaceae, pp. 251-258, Niğde, Turkey, 2016.
- [18] L. Tubic, J. Savic, N. Mitic J. Milojevic, D. Janosevic, S. Budimir and S. Zdravkovic'-Korac, Cytokinins differentially affect regeneration, plant growth and antioxidative enzymes activity in chive (*Allium schoenoprasum* L.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 124, 1–14, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11240-015-0869-1>.
- [19] H. T. Tung, H. T. Van, H. G. Bao, L. T. Bien, H. D. Khai, V. Q. Luan, D. M. Cuong, T. H. Phong and D. T.

- Nhut, Silver nanoparticles enhanced efficiency of explant surface disinfection and somatic embryogenesis in *Begonia tuberosa* via thin cell layer culture. *Vietnam Journal of Biotechnology*, 19(2), 337-347, 2021. <https://doi.org/10.15625/1811-4989/15872>.
- [20] A. B. Ghnaya, G. Charles and M. Branchard, Rapid shoot regeneration from thin cell layer explants excised from petioles and hypocotyls in four cultivars of *Brassica napus* L. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 92, 25–30, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11240-007-9298-0>.
- [21] M. Ekmekçigil, M. Bayraktar, Ö. Akkuş, A. Gürel, High-frequency protocorm-like bodies and shoot regeneration through a combination of thin cell layer and RITA® temporary immersion bioreactor in *Cattleya forbesii* Lindl. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 136, 451–464, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11240-018-1526-2>.
- [22] S. Vyas, S. Guha, P. Kapoor and U. Rao, Micropropagation of *Cymbidium Sleeping Nymph* through protocorm-like bodies production by thin cell layer culture. *Scientia Horticulturae*, 123 (4), 551-557, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.11.020>.
- [23] S. Parthibhan, M. V. Rao, J.A. Teixeira Da Silva and T. S. Kumar, Somatic embryogenesis from stem thin cell layers of *Dendrobium aqueum*. *Biologia Plantarum*, 62 (3), 439-450, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10535-018-0769-4>.
- [24] P. Zhao, W. Wang, F. S. Feng, F. Wu, Z. Q. Yang and W. J. Wang, High-frequency shoot regeneration through transverse thin cell layer culture in *Dendrobium Candidum* Wall Ex Lindl. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 90:131–139, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11240-006-9181-4>.
- [25] B. V. Le, M. Jeanneau, N. T. Do My, J. Vidal, K. T. Thanh Vân, Rapid regeneration of whole plants in large crabgrass (*Digitaria sanguinalis* L.) using thin-cell-layer culture. *Plant Cell Reports*, 18, 166–172, 1998. <http://dx.doi.org/10.1007/s002990050551>.
- [26] S. K. Singh, M. K. Rai and L. Sahoo, An improved and efficient micropropagation of *Eclipta alba* through transverse thin cell layer culture and assessment of clonal fidelity using RAPD analysis. *Industrial Crops and Products*, 37(1), 328-333, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.12.005>.
- [27] J. E. Scherwinski-Pereira, R. S. da Guedes, P.C. P. Fermino Jr, T. L. Silva and F. H. S. Costa, Somatic embryogenesis and plant regeneration in oil palm using the thin cell layer technique. *In vitro cell and developmental biology-Plant*, 46, 378–385, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11627-010-9279-6>.
- [28] R. Abdolinejad, A. Shekafandeh, A. Jowkar, A. Gharaghani and A. Alemzadeh, Indirect regeneration of *Ficus carica* by the TCL technique and genetic fidelity evaluation of the regenerated plants using flow cytometry and ISSR. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 143, 131–144, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01903-5>.
- [29] C. N. Mendoza-Pena and A. K. Hvoslef-Eide, A novel genotype-independent technique for successful induction of somatic embryogenesis of adult plants of *Jatropha curcas* L. using petiole transverse Thin Cell Layer (TCL). *African Journal of Biotechnology*, 20(2), 85-91, 2021. <https://doi.org/10.5897/AJB2020.17232>.
- [30] D. T. Nhut, B. V. Le, N. T. Minh, J. Teixeira de Silva, S. Fukai, M. Tanaka and K. Tran Thanh Van, Somatic embryogenesis through pseudo-bulblet transverse thin cell layer of *Lilium longiflorum*. *Plant Growth Regulation*, 37, 193–198, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1020532511081>.
- [31] B. Bose, S. Kumaria, H. Choudhury and P. Tandon, Insights into nuclear DNA content, hydrogen peroxide and antioxidative enzyme activities during transverse thin cell layer organogenesis and *ex vitro* acclimatization of *Malaxis wallichii*, a threatened medicinal orchid. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 23(4):955-968, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0474-3>.
- [32] D. T. Nhut, B. V. Le and K. Tran Thanh Van, Somatic embryogenesis and direct shoot regeneration of rice (*Oryza sativa* L.) using thin cell layer culture of apical meristematic tissue. *Journal Of Plant Physiology*, 157, 559-565, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(00\)80112-1](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(00)80112-1).
- [33] R. Ghahremani, S. D. Daylami, M. Mirmasoumi, N. Askari and K. Vahdati, Refining a protocol for somatic embryogenesis and plant regeneration of *Phalaenopsis amabilis* cv. Jinan from mature tissues. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 45, 356-364, 2021.
- [34] M. H. Cruz de Carvalho, B. Van Le, Y. Zuily-Fodil, A. T. Pham Thi and K. Tran Thanh Van, Efficient whole plant regeneration of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) using thin-cell-layer culture and silver nitrate. *Plant Science*, 159, 223 – 232, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00346-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00346-0).
- [35] M. A. Ramirez-Mosqueda, L. G. Iglesias-Andreu, A. A. Armas-Silva, E. J. Cruz-Gutierrez, J. F. de la Torre-Sanchez, O. R. Leyva-Ovalle and C. M. Galan-Paez, Effect of the thin cell layer technique in the induction of somatic embryos in *Pinus patula* Schl. et Cham. *Journal of Forestry Research*, 30, 1535–1539, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0663-0>.
- [36] B. N. Vaidya, C. L. Jackson, Z. D. Perry, S. A. Dhekney and N. Joshee, Agrobacterium-mediated transformation of thin cell layer explants of *Scutellaria ocmulgee* small: a rare plant with anti-tumor properties. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 127, 57–69, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11240-016-1029-y>.
- [37] B. Chattopadhyaya, J. Banerjee, A. Basu, S. K. Sen and M. K. Maiti, Shoot induction and regeneration using internodal transverse thin cell layer culture in *Sesamum indicum* L. *Plant Biotechnology Reports*, 4, 173–178, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11816-010-0133-4>.
- [38] S. K. Singh, M. K. Rai, P. Asthana and L. Sahoo, An improved micropropagation of *Spilanthes acmella* L. through transverse thin cell layer culture. *Acta*



- Physiologiae Plantarum, 31, 693–698, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11738-009-0280-9>.
- [39] M. A. Ramirez-Mosqueda and L. G. Iglesias-Andreu, Direct Organogenesis of *Stevia rebaudiana* Bertoni Using Thin Cell Layer (TCL) Method. Sugar Tech, 18, 424–428, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12355-015-0391-0>.
- [40] J. Swarna and R. Ravindhran, In vitro organogenesis from leaf and transverse thin cell layer derived callus cultures of *Talinum triangulare* (Jacq.) Willd. Plant Growth Regulation, 70, 79–87, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10725-012-9780-5>.
- [41] P. Baskaran, A. Kumari and J. V. Staden, In vitro propagation via organogenesis and synthetic seeds of *Urginea altissima* (L.f.) Baker: a threatened medicinal plant. 3 Biotech, 8, 18, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-1028-7>.
- [42] B. V. Le, M. H. Cruz de Carvalho, Y. Zuily-Fodil, A. T. Pham Thi and K. Tran Thanh Van, Direct whole plant regeneration of cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp] from cotyledonary node thin cell layer explants. Journal of Plant Physiology, 159, 1255-1258, 2002. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00789>.
- [43] J. A. Teixeira da Silva, The role of thin cell layers in regeneration and transformation in orchids. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 113, 149–161, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11240-012-0274-y>.
- [44] P. Azadi, K. Bagheri, M. Gholami, M. Mirmasoumi, A. Moradi and A. Sharafi, Thin Cell Layer, a Suitable Explant for In vitro Regeneration of Saffron (*Crocus sativus* L.). Journal of Advanced Studies in Topology, 19(6), 1429-1435, 2017.
- [45] J. A. Teixeira da Silva and J. Dobránszki, The Plant Growth Correction Factor. I. The Hypothetical and Philosophical Basis. International Journal of Plant Developmental Biology, 5 (1), 73-74, 2011.
- [46] F. Jullien and K. Tran Thanh Van, Micropropagation and embryoid formation from young leaves of *Bambusa glaucescens* ‘Golden goddess’. Plant Science, 98, 2, 199-207, 1994. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0168-9452(94)90010-8).
- [47] C. Gendy, M. Sene, B. V. Le, J. Vidal, and K. Tran Thanh Van, Somatic embryogenesis and plant regeneration in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Plant Cell Reports, 15, 900-904, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF00231584>.
- [48] D. T. Nhut, B. V. Le, S. Fukai, M. Tanaka and K. Tran Thanh Van, Effects of activated charcoal, explant size, explant position and sucrose concentration on plant and shoot regeneration of *Lilium longiflorum* via young stem culture. Plant Growth Regulation, 33, 59–65, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010701024963>.
- [49] N. Çetin, B. Güler, A. Gürel, In Vitro Regeneration Potential of Thin Cell Layer Explants of Lentisk (*Pistacia lentiscus* var. Chia) Plant. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8(2), 960-977, 2021. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.947888>.
- [50] M. I. Kozgar and S. Khan, Induced mutagenesis in crop plants. in: M. I. Kozgar and S. Khan (Eds.), Bioremediation, Biodiversity and Bioavailability, Global Science Books, 6 (Special Issue 1), pp. 1-118.
- [51] S. Sharma, A. Shahzad, J. A. Teixeira da Silva, Synseed technology—A complete synthesis. Biotechnology Advances, 31, 186-207, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.09.007>

