



ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK MİMARLIK  
FAKÜLTESİ  
DERGİSİ

ÇUKUROVA UNIVERSITY  
JOURNAL OF THE FACULTY OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE

Cilt/Vol: 35

Sayı/Issue: 1

Mart/March 2020

ISSN 1019-1011



**ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK-MİMARLIK FAKÜLTESİ**  
**DERGİSİ**



**Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture**

**Sahibi (Owner)**

Mesut BAŞIBÜYÜK  
Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi Dekanı

**Editör (Editor)**

Özen KILIÇ

**EDİTÖR KURULU (Editorial Board)**

Selma Ayşe ÖZEL (ÇÜ)	Ulvi Can ÜNLÜGENÇ (ÇÜ)
Mustafa GÜVEN (ÇÜ)	Özen KILIÇ (ÇÜ)
Ahmet Mahmut KILIÇ (ÇÜ)	Olcayto KESKİNKAN (ÇÜ)
Hüseyin AKILLI (ÇÜ)	Ali KESKİN (ÇÜ)
Ulus ÇEVİK (ÇÜ)	R. Tuğrul OĞULATA (ÇÜ)
Ali KOKANGÜL (ÇÜ)	F. Duygu SABAN (ÇÜ)
Mesut BAŞIBÜYÜK (ÇÜ)	Hüseyin R. YERLİ (ÇÜ)
İsmail Hakkı ÇAĞATAY (ÇÜ)	Nil YAPICI (ÇÜ)
Metin GÜRÜ (GÜ)	Serter ATABAY (AUS-BAE)
Mehmet Emin AYDIN (UWE-İngiltere)	Muammer KOÇ (HBKU-BAE)
Azra BİLGİN (UCB-ABD)	Tamio ENDO (MU-Japonya)

**Hakemli Bir Dergidir. Yılda Dört Sayı Basılır. / Refereed Journal. Published Quarterly.**

Dergimiz **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi'nde taranmaktadır.  
Indexed by **TÜBİTAK ULAKBİM** Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı Listesi

**YAZIŞMA ADRESİ/CONTACT**

Ç.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergi ve Yayın Kurulu Başkanlığı Balcalı 01330 Sarıçam/ADANA  
Tel : (322) 338 63 57 Fax : (322) 338 61 26 E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr - cu.mmfdergi@gmail.com

## **AMAÇ ve KAPSAM**

Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, yılda dört sayı olarak yayımlanan hakemli bilimsel bir dergidir. Dergi akademik ve araştırma kurumlarındaki mühendislik ve mimarlık alanındaki araştırmacı ve uygulamacılara hizmet etmeyi amaçlamaktadır. Daha önce başka bir yerde yayımlanmamış tüm özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları kapsayan yenilikçi, değerli ve yararlı araştırma makaleleri kabul edilmektedir.

## **AIM and SCOPE**

Journal of the Engineering and Architecture of Çukurova University is a peer-reviewed scientific journal which is currently published quarterly. The journal aims to serve researchers and practitioners in the fields of engineering and architecture in academic and research organizations. All innovative, valuable, and useful research articles including original and current scientific research and applications, previously unpublished anywhere else, will be regarded.



## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

<b>Ürgüp Bölgesinde Olasılık Dağılımları ile GaAs Tip PV Enerji Üretim Potansiyelinin Modellenmesi.....</b>	<b>1</b>
<i>Modeling of GaAs Type PV Energy Production Potential with Probability Distributions in the Ürgüp Region</i>	
<b>İlker MERT</b>	
<b>Araç Parçalarının MEMS Manyetometre Sensör Çıktısına Etkisi .....</b>	<b>11</b>
<i>Effect of the Components of a Vehicle on a MEMS Magnetometer Sensor Output</i>	
<b>Murat BAKIRCI</b>	
<b>Farklı Atık Malzemeler ile Stabilize Edilmiş İnce Daneli Zeminin Mühendislik Özellikleri.....</b>	<b>19</b>
<i>Engineering Properties of Fine-Grained Soil Stabilized with Different Waste Materials</i>	
<b>Firdevs UYSAL, Vedat YILMAZ ve Hüseyin Mert TOPÇU</b>	
<b>Non-linear Control of Inverted Pendulum.....</b>	<b>27</b>
<i>Ters Sarkaç Sisteminin Doğrusal Olmayan Kontrolü</i>	
<b>Serdar COŞKUN</b>	
<b>Art Arda Farklı Mesafelerde Bulunan İki Binanın Akış Analizi.....</b>	<b>39</b>
<i>Flow Analysis of Two Consecutive Buildings at Different Distances</i>	
<b>Ahmet FERTELLİ ve Mehmet BALTA</b>	
<b>Failure Analysis of Low-density Polymer Foam Core Sandwich Structures under Three-point Bending Loading.....</b>	<b>49</b>
<i>Üç Nokta Eğilme Yükleme Altındaki Düşük Yoğunluklu Polimer Köpük Sandviç Yapıların Hasar Analizi</i>	
<b>Çağrı UZAY ve Necdet GEREN</b>	
<b>Peyniraltı Suyunun Koagülasyon/Flokülasyon Yöntemiyle Arıtılmasında Doğal Bir Koagülant Olan Montmorillonitin Kullanılması.....</b>	<b>59</b>
<i>The Use of Montmorillonite, A Natural Coagulant, for The Treatment of Whey by Coagulation/Flocculation Method</i>	
<b>Ayşe ÖZGÜVEN, Tuba BAYRAM, Dilara ÖZTÜRK ve Erdinç ALADAĞ</b>	
<b>Metamalzeme Yapılarıyla Fraktal Anten Parametrelerinin İyileştirilmesi.....</b>	<b>67</b>
<i>Improvement of Fractal Antenna Parameters with Metamaterial</i>	
<b>Emin ÜNAL ve Ceren DOĞAN</b>	

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Tasnif Edilmiş İnşaat Yıkıntı Atıklarından Elde Edilen Harman Tuğlası, Delikli Tuğla ve Çatı Kiremitinden Oluşan İkili Karışımların Geopolimer Hamur Üretiminde Değerlendirilmesi..... 79**  
*Assessment of Clay Brick, Hollow Brick and Roof Tile Provided from Assorted Construction and Demolition Waste in Geopolymerization*  
**Raci BAYER, Hüseyin ULUGÖL, İlhami DEMİR, Gürkan YILDIRIM ve Mustafa ŞAHMARAN**
- Gözebaşı Köyü (Elazığ Güneyi) Çevresindeki Yüksekova Karmaşığı'na ait Volkanik Kayaçların Jeokimyasal Özellikleri..... 91**  
*Geochemical Properties of the Volcanic Rocks of Yüksekova Complex Around Gözebaşı Village (South of Elazığ)*  
**Melek URAL**
- Madencilik Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetimi için Veri Entegrasyonu Uygulaması..... 105**  
*A Data Integration Application for Occupational Health and Safety Management in the Mining Industry*  
**Mustafa ERKAYAOĞLU**
- Doğal Bir Madde Olan Nişastadan Aktif Karbon Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Adsorbent Olarak Kullanımı..... 115**  
*Preparation of Activated Carbon from Natural Starch, its Characterization and Use as an Adsorbent*  
**Ömer KAZAK**
- Fabrication and Characterization of CuO Nanostructures: Applications in Electrocatalytic Hydrogen Production..... 127**  
*CuO Nanoyapıların Karakterizasyonu ve Üretimi: Elektrokatalitik Hidrojen Üretimindeki Uygulamaları*  
**Evrin BARAN AYDIN**
- Heat Conduction Analysis of Two-Dimensional Anisotropic Plate ..... 139**  
*İki Boyutlu Anizotropik Plakanın Isı İletim Analizi*  
**Durmuş YARIMPABUÇ, Ertuğrul CİHAN, Kerimcan ÇELEBİ ve Mehmet EKER**

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Feeding Electricity Ring Grids with Minimum Interruption Using Fuzzy Logic Based Relay Coordination Scenarios Under Interruption Conditions..... 149**  
*Kesinti Koşullarında Bulanık Mantık Tabanlı Röle Koordinasyon Senaryolarını Kullanarak Minimum Kesintili Elektrik Halka Şebekelerinin Beslenmesi*  
**Mehmet Uğraş CUMA, İrfan DEMİRAY ve Murat Mustafa SAVRUN**
- Elektrodepolanmış Nanokompozit Kaplamalarda Elektrolit Bileşenlerinin Etkisi..... 159**  
*Effect of Electrolyte Components on Electrodeposited Nanocomposite Coatings*  
**Ersin ÜNAL, Abdulkadir YAŞAR ve İsmail Hakkı KARAHAN**
- Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Sürekliliği Sağlamak için Optimum Enerji Karışımının Belirlenmesi: Kahramanmaraş Bölgesinde Bir Uygulama..... 173**  
*Determination of the Optimal Energy Mix to Ensure Continuity in Renewable Energy Sources: an Application in the Kahramanmaraş Region*  
**İsrafil KARADÖL, Ceyhan YILDIZ, Hakan AÇIKGÖZ ve Mustafa ŞEKKELİ**
- Yumurtalık Fayı'nın Holosen Aktivitesinin Araştırılması (Ceyhan-Adana)..... 183**  
*Investigation of Holocene Activity of the Yumurtalık Fault (Ceyhan-Adana)*  
**Meryem KARA, Ulvi Can ÜNLÜGENÇ, Hasan ELMACI ve Tamer Y. DUMAN**
- Ağ Elemanı Özelliklerinin Sayısal Model Sonuçları Üzerine Etkisinin Belirlenmesi..... 195**  
*Determining the Effect of Computational Grid Properties on Numerical Model Results*  
**Oğuz ŞİMŞEK, Hüseyin İŞLEK ve M. Sami AKÖZ**
- LiBr-Su Çözeltili Absorpsiyonlu Soğutma Çevriminin Soğutma Etkinliğinin Çeşitli Şartlarda Simülasyonu ..... 211**  
*Simulation of LiBr-Water Absorption Refrigeration Cycle Cooling Performance at Various Conditions*  
**Mehmet Tahir ERDİNÇ, Arif Emre AKTAŞ ve Alper YILMAZ**

## İÇİNDEKİLER/CONTENTS

- Effect of Boundary Conditions on Natural Frequencies of Orthotropic-Cored Composite Sandwich Beams..... 221**  
*Sınır Şartlarının Ortotropik Çekirdekli Kompozit Sandviç Kirişlerinin Doğal Frekanslarına Olan Etkisi*  
**Sefa YILDIRIM**
- Şevli Yapılarda Jeoteknik Ölçüm ve Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi (Şişli-İstanbul) ..... 227**  
*Geotechnical Measurement and Evaluation of Measurement Data in Slope Structures (Şişli-İstanbul)*  
**Veli KESKİN ve Sedat TÜRKMEN**
- Pressure Influence on the Thermophysical Properties of 316L Austenitic Stainless Steels Manufactured By Powder Metallurgy Method ..... 241**  
*Toz Metalurjisi ile Üretilen 316L Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Termofiziksel Özelliklerin Üzerindeki Basıncın Etkisi*  
**Ayşe Nur ACAR, Abdul Kadir EKŞİ ve Ahmet EKİCİBİL**
- Dökme Demir Malzemelerin Karbür Uçlarla Delme İşleminde Proses Parametrelerinin Optimizasyonu ..... 251**  
*Optimization of Process Parameters in Drilling of Cast Iron Materials with Carbide Drills*  
**Onur ERTUĞRUL, Oğuzcan GÜZELİPEK, Tuğrul SOYUSİNMEZ, Ali Tuğberk AKDOĞAN ve Aziz Burak GÜNEŞ**
- Yaya Yollarında Kullanılan Farklı Zemin Döşeme Malzemelerinin Kullanım Performanslarının Belirlenmesi..... 263**  
*Determination of the Usage Performance of Different Flooring Materials Used on Pedestrian Roads*  
**Ali SARIİŞİK ve Songül CAN**



## Ürgüp Bölgesinde Olasılık Dağılımları ile GaAs Tip PV Enerji Üretim Potansiyelinin Modellenmesi

İlker MERT<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>*Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Osmaniye*

*Geliş tarihi: 26.09.2019*

*Kabul tarihi: 15.05.2020*

### Öz

Ürgüp Türkiye'nin önemli turizm çekim merkezlerinden biridir. Turizm sektöründe tesislerin yüksek enerji çeken havalandırma, çamaşırhane ve soğuk depoları gibi birimlerinde tüketilen enerjiyi karşılamak amacıyla fotovoltaik (Solar-PV) sistemlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu manada önemli turizm noktalarından biri olan Ürgüp bölgesinde faaliyet gösteren turizm tesisleri ve bu konuda yatırım yapmak isteyen yatırımcılar için bölgenin PV panellerden elektrik enerjisi üretimi potansiyelinin belirlenmesi son derece önemlidir. Bu çalışmada Weibull ve Lognormal dağılımları ile Ürgüp bölgesinin güneş ışınımı verileri kullanılarak olasılık yoğunluk fonksiyonu yaklaşımı tabanlı GaAs Tip PV elektrik enerjisi potansiyelinin modellenmesi amaçlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Weibull dağılımı, Lognormal dağılım, Güneş ışınımı, GaAs Tip PV

### Modeling of GaAs Type PV Energy Production Potential with Probability Distributions in the Ürgüp Region

#### Abstract

Ürgüp is one of the major tourist attractions in Turkey. In the tourism sector, the use of photovoltaic systems is becoming widespread in order to meet the energy consumed in the units of the facilities such as ventilation, laundry and cold storage areas which attract high energy. In this sense, for the tourism facilities operating in the Ürgüp region, which is one of the important tourism points, and for investors who want to invest in this field, it is extremely important to determine the electricity generation potential of the region from photovoltaic panels. In this study, it is aimed to model photovoltaic electric energy potential based on probability density function approach with Weibull and Lognormal distributions by using solar radiation data of Ürgüp region.

**Keywords:** Weibull distribution, Lognormal distribution, Solar radiation, GaAs Type PV

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): İlker MERT, [ilkermert@osmaniye.edu.tr](mailto:ilkermert@osmaniye.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak güneş enerjisinden elektrik üretimi amacıyla yapılan güneş enerjisi santrali (GES) yatırımları giderek artmaktadır. Coğrafi konumu nedeniyle birçok ülkeye göre çok daha kullanışlı ve verimli alanlara sahip olan Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması fotovoltaik (Solar-PV) sistemlere olan ilgiyi artırmaktadır. GES yatırımının kuruluş izinlerinin kolay bir şekilde alınabilmesi ve devletin sağladığı teşvik-destekler girişimcileri GES kurmaya yöneltmektedir. Ayrıca GES'lerin ilk yatırım tutarında önemli bir kısmı oluşturan panel maliyetlerinin giderek düşmesi ve işletme döneminde karlılığı önemli oranda artıran panel verimlerinin artması gibi faktörler de GES yatırımı cazibesini artırmaktadır.

Coğrafi konumu açısından yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahip ülkelerden biri olan Türkiye'nin en fazla ve en çok güneş alan bölgesi Güneydoğu Anadolu Bölgesi'dir. Ardından Akdeniz Bölgesi, Doğu Anadolu bölgesi ve İç Anadolu bölgesi gelmektedir.

Ürgüp, İç Anadolu Bölgesinde Nevşehir İli'nin doğusunda yer almaktadır. Nevşehir yıllık yaklaşık 1560 kWh/m<sup>2</sup>'lik güneş ışınımı değeriyle önemli bir potansiyele sahiptir. Haziran, Temmuz ve Mayıs ayları en yüksek güneş ışınımı değerlerine ulaşıldığı aylar olurken, bu değerler Aralık ve Ocak aylarında düşmektedir. Ürgüp bölgesinde ise yıl bazında 1580 kWh/m<sup>2</sup>'lik güneş ışınımı değerine ulaşılabilir. [1].

Ülke ortalamasının oldukça üzerinde güneşlenme değerlerine sahip olan Ürgüp'te önemli GES yatırımlarının gelme potansiyeli oldukça yüksektir. Ürgüp yaz ve kış aylarında olmak üzere günlük 3,61 ile 12, 14 saat arasından değişen güneşlenme sürelerine sahiptir [1].

Tükettiği elektriği şebekeden temin eden otellerde enerji maliyetlerinin artması turizm işletmelerini alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Karlılıklarını artırmak ve giderlerini azaltmak isteyen şirketler, oteller de enerji tasarrufunun yanı sıra giderlerini düşürmek için hali hazırdaki ölü

alanlarını güneş enerjisinden faydalanmak için PV paneller kullanarak değerlendirme yoluna gitmektedirler.

Bu doğrultuda Ürgüp'te turizm sektöründe yer alan konaklama işletmelerinin faaliyetlerini daha ekonomik olarak sürdürebilmeleri için güneş enerjisine yönelerek yatırım yapmalarını avantajlı kılmaktadır. Çünkü enerjide sürdürülebilirliğin güneş enerjisi ile sağlanması halinde turizm hizmet maliyetlerinin düşmesi ve ekonomik bir ortamın sağlanması mümkün olacaktır.

Bu mana da bölgede faaliyet gösteren konaklama otelleri modern güneş enerjisi sistemleriyle kendi enerjilerini üretilip işletmelerinin enerji maliyetlerini düşürmek imkanına sahip bulunmaktadır.

Güneş enerjisinin kullanımı konusunda gerçekleştirilecek planlamalarda güneş ışınımı hesaplamaları büyük önem taşımaktadır. Güneş ışınımı hesaplamaları kurulacak güneş enerjisi sistemlerinin üreteceği elektrik miktarlarının belirlenmesini sağlamaktadır.

Bu manada literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Külcü [2], Isparta İli'nde atmosfer dışına gelen güneş ışınımı ile yeryüzüne gelen ışınımı Angstrom-PreScott tabanlı modelleri ile tahmin etmişlerdir.

Taşkın ve Korucu [3], bir çalışmalarında Kahramanmaraş İli güneş enerjisi potansiyeli ve kullanım olanaklarını araştırmışlar ve bölgenin yıllık toplam 2918 saat güneşlenme süresine ve 1608 kWh/m<sup>2</sup> ışınım şiddetine sahip olduğu belirlenmişlerdir.

Bakırcı [4], güneşlenme süresine bağlı olarak farklı tipteki Angström-tip eşitliklerin yardımıyla Erzurum'da aylık ortalama günlük global (toplam) güneş ışınımının tahmini için kullanılabilirliğini araştırmıştır. Üstelik Erzurum'da aylık ortalama günlük global güneş ışınımı hesabı için, üçüncü dereceden bir eşitlik geliştirmiştir.

Kallioğlu ve arkadaşları [5], Adıyaman İli için yatay düzleme gelen toplam güneş ışınımını araştırmışlardır. Yapılan bu araştırma sonucunda, güneş ışınımı tahmininde kullanılacak polinom model ile sayısal modellemenin gerçeğe yakın kararlı sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Karaca ve Uçar [6], Burdur İli için bir konutun ortalama günlük enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için 4 farklı PV sistemi değerlendirilmiştir. PV panellerin 10°-30° arasında eğim ile çatıya konumlandırılmasını önermişlerdir.

PV sistemi ve güneş ışınımı ile ilgili araştırmalar genellikle Angström-tip eşitlikler veya yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilmektedir [7].

Ancak meteorolojik veriler gibi bazı veri tiplerinin istatistiksel olarak belirli kurallara göre dağılım gösterdiği bilinmektedir [8].

İstatistiksel çözümler ise belirli bir olasılık dağılımına dayandırıldığında çözümlenmede kullanılan değişkenlerin bu olasılık dağılımına uyması gerekir.

Bu çalışmada güneş ışınımı verilerinin bir olasılık dağılımına uyduğu varsayımıyla Weibull ve Lognormal dağılımları ile modelleme yapılmıştır.

Bu dağılımlar genellikle dünyanın birçok bölgesinin rüzgâr dağılımını temsil etmek için kullanılan dağılımlardır

Ancak güneşlenme süresi, sıcaklık ve bulutluluk gibi parametreler ile global güneş ışınımı arasındaki ilişkiye dayanan Angström-tip istatistiksel modeller dikkate alındığında istatistiksel dağılımların da değerlendirilmesi mümkündür[9].

Diğer yandan güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak kullanılan teknolojiye göre %10 ile %25 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilmektedir [10].

Güneş paneli verimliliği, bir güneş panelinin güneş ışığını ne kadar iyi yakaladığını ve bunu elektrik

enerjisine dönüştürdüğünün bir göstergesidir. Aynı koşullar altında, yüksek verimli güneş paneli aynı boyuttaki daha düşük verimlilikte bir panelden daha fazla elektrik üretebilir. Bu nedenle güneş ışınımı araştırmalarında güneş panellerinin verimi de dikkate alınmalıdır. Konuya ilgi duyan yatırımcılar ve araştırmacılar açısından mevcut istatistiksel programlar ile daha düşük maliyet ve daha az ölçüm verisi kullanılarak PV potansiyeli belirleme konusunda farklı yöntemlerin bulunması önemlidir.

Çalışma ile literatürde genellikle rüzgar enerjisi tahmininde kullanılan olasılık dağılımlarının bu çalışmayla birlikte güneş enerjisi değerlendirmelerinde farklı bir bakış açısı olarak kullanılabilirliğini ortaya koymak hedeflenmiştir.

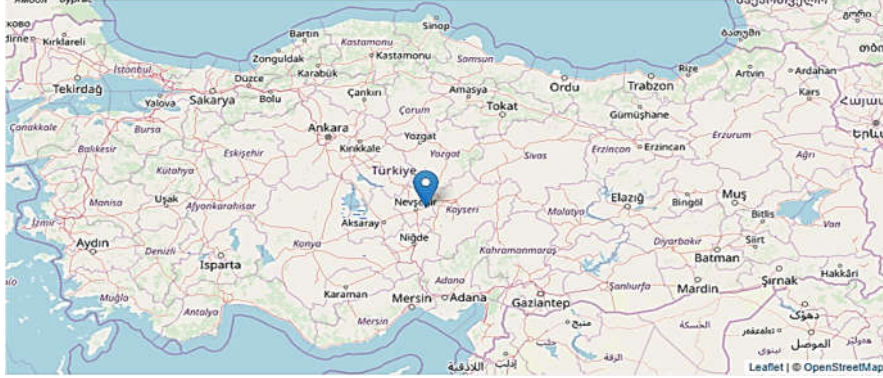
Bu çalışmada Ürgüp bölgesinde Weibull ve Lognormal dağılımları ile modellenen eğik düzleme düşen güneş ışınımının sabit panel verimi ve eğimi şartlarında elde edilebilecek GaAs Tip PV enerji üretim potansiyeli araştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Ürgüp, Nevşehir İli'ne bağlı ve il merkezine 20 km uzaklıkta yer alan (boylam: 34.912182, enlem: 38.631169) bir ilçedir. Her yıl yerli yabancı pek çok turist ziyaret edilen Ürgüp'te yaz aylarında havanın oldukça sıcak geçmesi yerli ve yabancı turist sayısının da zirve noktaya ulaşmasının etkisi ile elektrik talebi artmaktadır. Elektrik tüketiminin büyük bir kısmının turistik tesislerde gerçekleşmesi ve elektrik maliyetinin otellerin gider kalemleri arasında üst sıralara yükselmesi bölgede alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmaktadır [11].

Bu çalışmada bölgenin güneş enerjisi potansiyelinin belirlenmesi amacıyla Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından 2007-2010 yılları arasında kayıt altına alınan meteoroloji ve güneş verileri kullanılmıştır [12]. Ölçümlerin yapıldığı bölgeye ait harita Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Ölçümlerin yapıldığı bölgeye ait harita (Openstreetmap, 2019)

## 2.1. Güneş Enerjisi

Üretilen PV gücünü hesaplamak için toplam küresel radyasyon gereklidir. Solar PV panellerinin potansiyelin belirlenmesi açısından panel güç çıkışı ( $P_{PV}$ ) ampirik olarak Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanabilir [13].

$$P_{PV} = H_T \eta_{PV} A_{PV} \quad (1)$$

burada  $H_T$ , ortalama güneş ışınımı ( $Mj/m^2$ ),  $P_{PV}$  toplam elektrik gücü,  $A_{PV}$  PV panel alanı ve  $\eta_{PV}$  ise %18 olarak alınan PV panellerin elektriksel verimliliğidir. Eşitlikte PV'ler için belirlenen enerji üretim değerleri eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük radyasyon değerleri ile hesaplanmaktadır.

PV panellerde hem fotoelektrik dönüşüm verimliliği hem de güç dönüşüm verimliliğinin kademeli olarak düşmesine rağmen, bu parametrelerin varyasyonlarının sistemin kullanım ömrü boyunca çok az olduğu ve bu nedenle PV potansiyeli hesaplamaları açısından göz ardı edilebileceği dikkat çekmektedir.

PV sisteminin güç çıkışı yalnızca sistem yapılandırmasıyla ilgili değil aynı zamanda birçok hava koşulundan da etkilenir. Bu nedenle mevcut PV güç tahmin yöntemlerinin çoğu meteorolojik koşulları girdi değişkenleri olarak alır. Böylece, sistemin çıktısının PV güç değerleri çok değişkenli, zamana göre değişen dinamik bir sistem olarak modellenebilir.

Eğik bir yüzey üzerinde meydana gelen güneş ışınımı dikkate alındığında, eğimli bir PV paneli için  $H_T$ , meydana gelen toplam radyasyon ( $Mj/m^2$ ) olup, direkt, difüz ve yansıyan bileşenlerden oluşur [14] (Eşitlik 2).

$$H_T = H \left( 1 - \frac{H_D}{H} \right) \bar{R}_b + H_d \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + H_p \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (2)$$

Burada  $\bar{R}_b$  eğik yüzeye düşen günlük direkt ışınımın ( $H_{bT}$ ) yatay yüzeye düşen günlük direkt ışınım ( $H_b$ ) oranı olarak tanımlanabilir [15] (Eşitlik 3).

$$\bar{R}_b = \frac{H_{bT}}{H_b} \quad (3)$$

Kuzey yarımkürede güneşe dönük yüzey için; (Eşitlik 4).

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos\delta \sin\omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\phi - \beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin\phi \sin\delta} \quad (4)$$

Burada  $\omega'_s$  hesaplama yapılan ayın ortalama gününde eğik düzlem için güneş ışınlarının eğik yüzey üzerine ilk düşüş saat açısıdır.  $\beta$ ,  $\phi$ , ve  $\delta$  yüzeyin eğim açısını ( $^\circ$  derece), enlem açısını ( $^\circ$  derece) ve deklinasyon açısını ( $^\circ$  derece) ifade etmektedir (Eşitlik 5).

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \left(\frac{284+n}{365}\right)\right) \quad (5)$$

$\omega_s$  ve  $\omega'_s$  ise Eşitlik 6 ve 7'de verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (6)$$

$$\omega'_s = \min \left[ \frac{\cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta)}{\cos^{-1}(-\tan(\phi-\beta)\tan\delta)} \right] \quad (7)$$

indeksi ( $K_T$ )'ne bağlı  $H_d/H$  oranı ise Tübitak-M.A.M. tarafından yapılan ölçümler neticesinde elde edilen verilere bağlı olarak regresyonel olarak aşağıda verildiği şekilde ifade edilebilir [16] (Eşitlik 8).

$$\frac{H_d}{H} = 0,703 - 0,414K_T - 0,428K_T^2 \quad (8)$$

Burada  $K_T$  yatay düzleme gelen günlük toplam güneş ışınımı ( $H$ )'nın atmosfer dışına düşen günlük toplam güneş ışınımı ( $H_0$ )'na ( $Mj/m^2$ ) oranıdır.

## 2.2. Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları

Bu çalışmada PV panel güç üretimini değerlendirmek için önce sahadaki  $H_T$  modellenmiştir. Bunu yapmak için,  $H_T$  olasılığı, Weibull olasılık dağılım fonksiyonu (OYF) ile temsil edilmiştir.  $H_T$  açısından Weibull OYF aşağıdaki şekilde verilebilir [17] (Eşitlik 9).

$$f(H_T)_W = \frac{k}{c} \left(\frac{H_T}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ -\left(\frac{H_T}{c}\right)^k \right] \quad (9)$$

Burada  $k$  ve  $c$  sırasıyla sırasıyla, şekil (shape) ve ölçek (scale) parametreleridir.

İki Weibull parametresini,  $k$  ve  $c$ 'yi belirlemek için Maksimum Likelihood ve en küçük kareler metodu gibi birçok farklı yöntem vardır. Bu çalışmada parametreler Maksimum Likelihood metodu (MLM) kullanılarak türetilmiş ve en iyi  $k$  ve  $c$  parametreleri, her ay için belirlenmiştir.

Sahadaki  $H_T$  olasılığı ayrıca Lognormal olasılık dağılım fonksiyonu (OYF) ile temsil edilmiştir.

$H_T$ 'ye ilişkin  $\ln H_T$  olasılık dağılımı normal ise,  $H_T$ 'nin olasılık dağılımı, logaritmik normal dağılım ya da kısaca lognormal dağılım terimiyle adlandırılabilir. Bu durumda OYF şöyledir; (Eşitlik 10).

$$f(H_T)_L = \frac{1}{\sigma H_T \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln H_T - \mu}{\zeta} \right)^2 \right] \quad (10)$$

Burada  $\sigma$  ve  $\mu$  sırasıyla ölçek ve lokasyon parametreleridir.

## 2.3. Hata Değerlendirme Kriterleri

İstatistiksel veri olarak, ortalama hata kareleri kökü (RMSE) kısa dönem ölçülen ve tahmin edilen model performanslarının kıyaslanması açısından önemli olup Eşitlik 10 ile hesaplanabilir. RMSE her zaman pozitif değerli olup ideal değeri sıfıra en yakın sonuçtur (Eşitlik 11).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - c_i)^2} \quad (11)$$

Belirlilik katsayısı ( $R^2$ ) bir değişkenin diğerine hangi oranda bağlı olduğu diğer bir deyişle bağımlı ve bağımsız değişken arasındaki ilişkinin yönü hakkında bir göstergedir [18]. Hesaplanan ve ölçülen değerler arasındaki doğrusal ilişkiyi yorumlayabilmek için kullanılır.  $R^2$  değeri 0 ile 1 arasındadır. İdeali 1'e en yakın değerdir (Eşitlik 12).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i - c_a)(m_i - m_a)}{\sum_{i=1}^n (c_i - c_a)^2 \sum_{i=1}^n (m_i - m_a)^2} \quad (12)$$

Burada,  $c_i$  hesaplanan değeri gösterirken,  $m_i$  ölçülen değeri simgelerken,  $c_a$  ve  $m_a$  ise hesaplanan ve ölçülen değerlerin ortalamasıdır.

## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Fotovoltaik sistem uygulamalarında eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük güneş ışınımı miktarlarının hesaplanabilmesi için eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışınımın ( $H_T$ ), bilinmesi gereklidir. Bu amaçla ölçüm verilerinde yer alan yatay yüzeye düşen günlük direkt ışınım değerleri ve Eşitlik 2-8 yardımıyla  $35^\circ$  eğime sahip PV paneli için  $H_T$  ( $Mj/m^2$ ) değerleri hesaplanmıştır. Aylık bazda günlük ortalamalar dikkate alındığında  $H_T$  ( $Mj/m^2$ ) için ortalama, standart sapma (StSap) ve varyans değerleri 18,371, 2,982 ve 8,895 ( $Mj/m^2$ ) olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte minimum ve maksimum değerleri ise 13,513 ve 22,519 ( $Mj/m^2$ ) olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen  $H_T$  ( $Mj/m^2$ ) değerleri Eşitlik 9 ve 10 ile verilen Weibull ve Lognormal dağılımları ile modellenmiştir. Modellere ait parametreler ve StSap değerleri Çizelge 1’de verilmektedir.

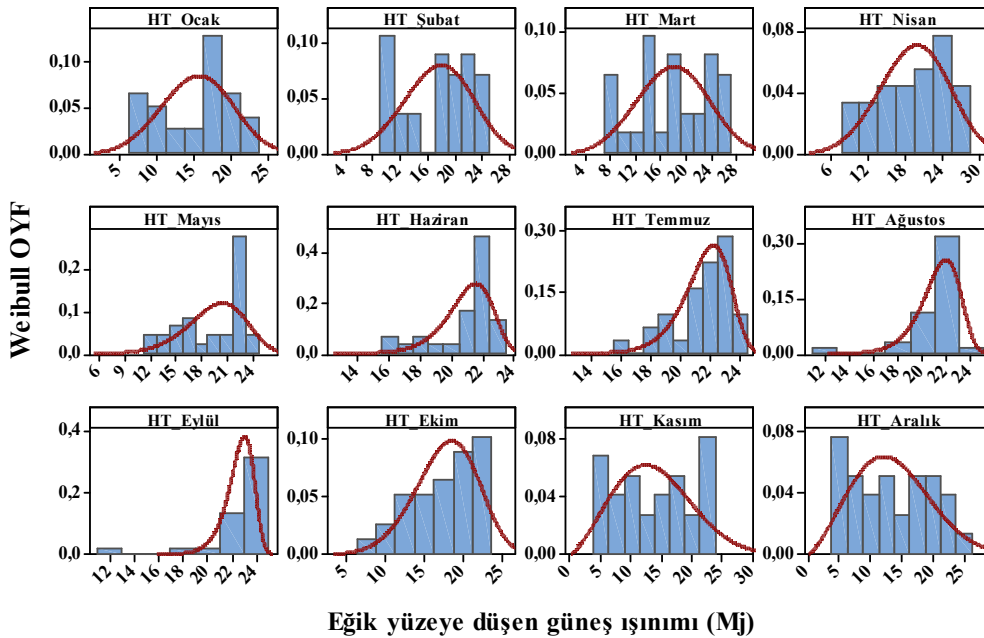
2,3925 ve 15,1728 ( $Mj/m^2$ ) (Aralık) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 1’de görüldüğü gibi Weibull OYF’ e ait en büyük k ve c değerleri 24,2359 ve 23,1328 ( $Mj/m^2$ ) (Eylül), en küçük k ve c değerleri ise

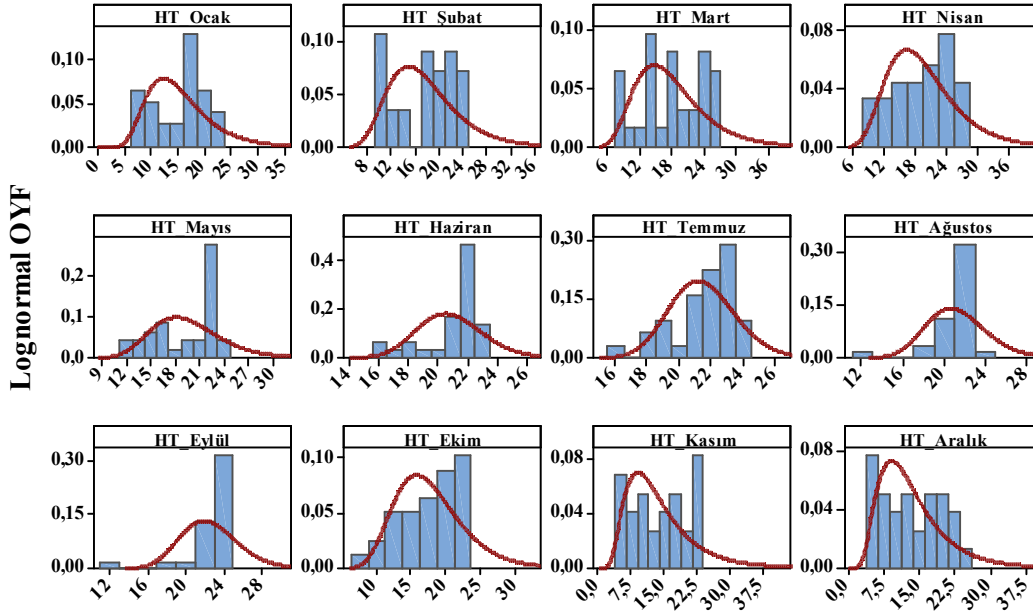
Lognormal OYF’ e  $\mu$  değerleri yıl boyunca 2,4742 ile 3,0619 arasında değişirken  $\sigma$  değerleri 0,0945 ile 0,5355 ( $Mj/m^2$ ) arasında değişmektedir. StSap değerleri ise yaz aylarında düşerken mevsim geçişleriyle birlikte artış eğilimi göstermektedir.

**Çizelge 1.** Weibullve Lognormal OYF parametreleri

Ay	Weibull OYF parametreleri			Lognormal OYF parametreleri		
	k	c	StSap	$\mu$	$\sigma$	StSap
1	3,7780	17,0576	4,5525	2,6656	0,3798	6,0861
2	4,0492	19,3128	4,8603	2,8078	0,3307	5,9502
3	3,6384	19,7018	5,4285	2,8133	0,3634	6,6883
4	3,9982	21,3723	5,4368	2,9076	0,3433	6,8707
5	6,7469	20,9798	3,4055	2,9477	0,2132	4,2049
6	16,2814	21,6736	1,5860	3,0327	0,1058	2,2142
7	16,1217	22,2473	1,6430	3,0619	0,0945	2,0323
8	15,4098	22,0534	1,6986	3,0473	0,1353	2,8889
9	24,2359	23,1328	1,1634	3,1071	0,1320	2,9893
10	5,1212	19,3428	3,9854	2,8403	0,2788	5,0598
11	2,4321	15,7186	6,1131	2,5043	0,5355	8,1372
12	2,3925	15,1728	5,9861	2,4742	0,5107	7,3838



**Şekil 2.**  $H_T$  dağılım olasılığının Weibull OYF ile modellenmesi



Eğik yüzeye düşen güneş ışınımı (Mj)

Şekil 3.  $H_T$  dağılım olasılığının Lognormal OYF ile modellenmesi

Şekil 2’de  $H_T$  ( $Mj/m^2$ ) dağılım sıklığının Weibull OYF ile modellenmesi görülmektedir. Burada Weibull OYF,  $H_T$  ( $Mj/m^2$ )’nin herhangi bir şiddette yüzeye düşme değerinin olasılığını gösteren fonksiyondur.  $c$  ve  $k$  değerleri arttıkça olasılık eğrisinin sağa çarpık hale geldiği ve olasılığın 0 dan uzaklaştığı yani yüksek  $H_T$  ( $Mj/m^2$ ) sıklığını daha iyi modellediği görülmektedir.

Şekil 3’de  $H_T$  ( $Mj/m^2$ ) dağılımının Lognormal OYF ile modellenmesi görülmektedir. Burada Lognormal OYF,  $H_T$  ( $Mj/m^2$ )’nin herhangi bir şiddette yüzeye düşme değerinin olasılığını gösteren fonksiyondur.  $\mu$  değerlerinin azalmasıyla olasılık eğrisinin sola çarpık hale geldiği ve 0’a yaklaştığı yani düşük  $H_T$  ( $Mj/m^2$ ) sıklığını daha iyi modellediği görülmektedir. Yaz aylarında ise basınlığın azalarak normal dağılıma yaklaştığı görülmektedir.

Weibull ve Lognormal OYF ile gerçekleştirilen  $H_T$  tahmin değerleri Çizelge 2’de verilmektedir.

Çizelge 2. Weibull ve Lognormal OYF  $H_T$  tahmini

Ay	$H_T$	$H_T$ Wei	$H_T$ Log
1	15,3323	15,4114	15,4515
2	17,4327	17,5173	17,5041
3	17,6986	17,7636	17,8021
4	19,3081	19,3714	19,4248
5	19,4728	19,5875	19,4999
6	20,8638	20,9818	20,8696
7	21,4605	21,5309	21,4644
8	21,2265	21,3141	21,2516
9	22,5191	22,6194	22,5510
10	17,7267	17,7845	17,7992
11	13,8937	13,9379	14,1214
12	13,5130	13,4496	13,5259
Hata	RMSE	0,0352	0,0568
Uyum	$R^2$	0,9998	0,9994

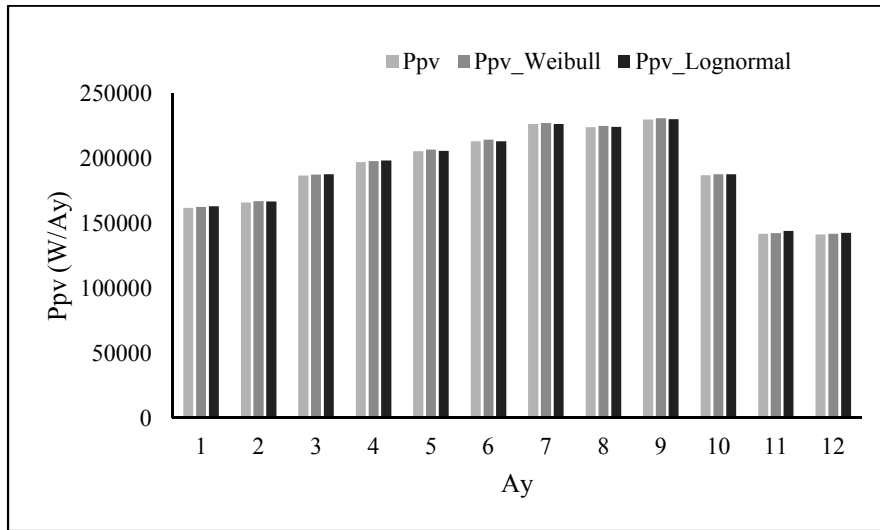
Weibull OYF ile gerçekleştirilen  $H_T$  tahmin değerleri 13,4496 ile 22,6194 ( $Mj/m^2$ ) değerleri arasında değişirken Lognormal OYF ile gerçekleştirilen  $H_T$  tahmin değerlerinin 13,5259 ile 22,5510 ( $Mj/m^2$ ) değerleri arasında değiştiği Çizelge 2’de görülmektedir. Model değerlendirme kriteri olarak kullanılan RMSE ve  $R^2$  değerleri

incelendiğinde ise Weibull OYF ile gerçekleştirilen  $H_T$  tahmin değerleri gözlem değerleri ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. Weibull OYF ile 0,9998  $R^2$  değerine ulaşılırken hata değeri olarak RMSE için 0,0352 değerinin yakalandığı görülmektedir. Bu manada hesaplanan parametre değerlerine göre çizilen Weibull sıklık eğrisinin ve ortalama  $H_T$  tahmin değerlerinin gözlem verilerini daha iyi temsil ettiği görülmektedir.

Galyum arsenit (GaAs) fotovoltaik uygulamalar için en yaygın kullanılan yarı iletken bileşiklerden biridir. GaAs-GaAs Solar Hücre Teknolojisi yüksek elektron hareketliliği sayesinde %30 verimlilik oranına ulaşmaktadır. Amerika'da faaliyet gösteren Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından dünyada en yüksek verime sahip PV modülleri arasında gösterilmektedir. Kristalin silikon PV sistemlere göre ışığa duyarlılığı daha yüksek olan GaAs tip PV modülleri 250 °C'ye ulaşan sıcaklıklara dayanabilmektedir. Bu nedenle çalışma esnasında PV potansiyeli hesaplanırken GaAs tip PV modülleri dikkate alınmıştır. Bununla birlikte,

endüstriyel olarak üretilen güneş modülleri, standart test koşulları altında %18 ila %22 arasında değişen verim elde etmektedir. Bu nedenle hesaplamalarda %18 verimlilik esas alınmıştır [19].

Meteorolojiden elde edilen verilerle hesaplanan  $H_T$  değerleri ve Weibull ve Lognormal OYF ile gerçekleştirilen  $H_T$  tahmin değerlerine bağlı olarak Eşitlik 1 yardımıyla elde edilen aylık PV enerji üretim potansiyeli değerleri 6,8 m<sup>2</sup> panel alanı dikkate alındığında Şekil 4'de görülmektedir. Bölgenin Ekim ayına kadar düzenli olarak artan üretim potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmektedir. Gözlemlerde elde edilen  $P_{PV}$  değerleri gün bazında aylık ortalama 138035,265 ve 230032,977 W arasında değişirken Weibull ve Lognormal ile  $P_{PV}$  tahmin değerleri 137387,7 ile 231057,2 ve 138167,1 ile 230358,5 W arasında değişmektedir. Gözlemlerde elde edilen ve Weibull ve Lognormal  $H_T$  tahmin değerlerine bağlı olarak hesaplanan yıllık bazda enerji üretim potansiyeli değerleri 2251,87, 2260,27 ve 2260,23 kW olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Weibull ve Lognormal OYF ile  $P_{PV}$  tahmini

Önceki çalışmalar [20-24] ve değerlendirmeler ışığında yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde ediminin özellikle güneş enerjisi kaynaklı üretim tekniklerinin önemini koruduğu açıktır.

Etier ve arkadaşları [25], 10 kW PV sistemin tasarımı ve simülasyonunu araştırmışlar. 50-110-300 W güce sahip paneller ile yapılan çalışmalarda yıllık 17515 kW üretim değerlerini ulaştığını



ifade etmişlerdir. Rai ve arkadaşları [26], Hindistan'da, 100 kW PV sistem üzerinde yaptıkları çalışmada yıllık 156120 kW üretim değerlerine ulaşabileceğini değerlendirmişlerdir. Kumar ve Sudhakar [27], Ramagundam'da kurulu 10 MW'lık şebekeye bağlı güneş fotovoltaik enerji santralinin performans çalışması yıllık olarak değerlendirilmişler ve yıllık bazda 16047 MW üretim değerlerine ulaşabileceğini bildirmişlerdir. Bu araştırmalar ışığında çalışmanın literatürle ilgili uyumlu değerlendirilmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışma ile temel düşünce olarak rüzgar enerjisi tahmininde kullanılan olasılık dağılımlarının güneş enerjisi değerlendirmelerinde farklı bir yaklaşım olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Zira PV potansiyeli belirleme konusunda olasılık dağılım fonksiyonları ile düşük maliyetle ve daha az ölçüm verisi kullanarak önemli sonuçlara ulaşmak mümkündür.

Bu amaçla çalışmada, Ürgüp bölgesinde eğik düzleme düşen aylık ortalama günlük toplam ışımının ( $H_T$ ) yoğunluğu ve dağılımı parametrelerinin istatistiksel analizi, 2007-2010 yılları arasında ölçülen güneş verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme için Weibull ve Lognormal olasılık dağılımları kullanılmıştır. Nihayetinde ise aylık PV enerji üretim potansiyeli değerleri ve modelleme işleminin başarısını değerlendirmek için RMSE ve  $R^2$  değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar kısaca özetlemek gerekirse; aylık bazda günlük ortalamalar dikkate alındığında  $H_T$   $Mj/m^2$  için ortalama değer 18,371  $Mj/m^2$  olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte minimum maksimum  $H_T$   $Mj/m^2$  değerleri ise 13,5130 ve 22,5191  $Mj/m^2$  olarak hesaplanmıştır.

Weibull dağılımına ait en büyük  $k$  ve  $c$  değerleri 24,2359 ve 23,1328  $Mj/m^2$  Eylül ayı için hesaplanmıştır

Lognormal dağılımına ait  $\sigma$  değerleri 0,0945 ile 0,5355  $Mj/m^2$  arasında değişmektedir.

Weibull dağılımı ile model başarısında 0,9998 ( $R^2$ ) ve 0,0352 (RMSE) değerlerine ulaşılmıştır.

Gözlemlerde elde edilen  $H_T$  değerleri, ay bazında günlük ortalama 13,5130 ve 22,5191  $Mj/m^2$  arasında değişirken yıllık bazda PV enerji üretim potansiyeli değeri 2251,87 kW seviyesine ulaşmaktadır.

Sonuç olarak Weibull sıklık eğrisinin ve hesaplanan ortalama  $H_T$  tahmin değerlerinin, gözlem verilerini daha iyi temsil ettiği ve yıl bazında PV enerji üretim potansiyelini modelleyebilme esnekliğine sahip olduğu değerlendirilmektedir.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yazar veri paylaşımından dolayı Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğüne teşekkür eder.

#### 6. KAYNAKLAR

1. Canka Kılıç, F., 2015. Güneş Enerjisi, Türkiye'deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, Engineer & The Machinery Magazine, 56(61), 28-40
2. Külcü, R., 2015. Isparta'da Yeryüzüne Ulaşan Güneş Işınımının Modellenmesi, Sdü Ziraat Fakültesi Dergisi, 10(1), 19-26.
3. Taşkın, O., Korucu, T., 2014. Kahramanmaraş İli Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Kullanım Olanakları, Tarım ve Doğa Dergisi, 17(4), 12-19.
4. Bakırcı, K., 2007. Yatay Yüzeye Gelen Global Güneş Işınımının Tahmini, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 29(2), 53-58
5. Kallioğlu, M.A., Ercan, U., Karakaya, H., Durmuş, A., 2017. Adıyaman İli'nde Yatay Düzleme Gelen Global Güneş Işınım Değerlerinin Ampirik Modeller ile Geliştirilmesi, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(1), 151-159.
6. Karaca, Ü.B., Uçar, S., 2018. Konut Çatı ve Cephelerinde Farklı Fotovoltaik Sistem Uygulamalarının Değerlendirilmesi, Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(2), 65-76.

7. Akarşlan, E., Hocaoğlu, F.O., Rüzgar Hızı Verilerinin Yeni Bir Yaklaşım ile Modellenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(1), 121-128.
8. Mert, İ., Karakuş, C., Peker, F., 2014. Antakya Bölgesi Rüzgar Karakteristiğinin İncelenmesi, Dümf Mühendislik Dergisi, 5(1), 13-22.
9. Ozgoren, M., Bilgili, M., Sahin, B. 2012. Estimation of Global Solar Radiation Using ANN Over Turkey. Expert Systems with Applications, 39(5), 5043-5051.
10. Koç, A., Aksal, M.E., Güneş Enerjisinin Taşıtlarda Kullanımı ve Kırıkkale Üniversitesi Güneş Enerjili Araç Projesi Örneği, Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 4(2), 15-20.
11. Çöteli, M.G., 2012. Kültürel Peyzajın Korunması ve Sürdürülebilir Kentsel Gelişiminin Yaratılması Yönünde Bir Politika Önerisi, Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 1(32), 35-74.
12. Üstün, İ., Karakuş, C., Yağlı, H., 2020. Empirical Models for Estimating the Daily and Monthly Global Solar Radiation for Mediterranean and Central Anatolia Region of Turkey; International Journal of Global Warming, 20(3), 249-27.
13. Al-Najideen, M.I., Alrwashdeh, S.S., 2017. Design of a Solar Photovoltaic System to Cover the Electricity Demand for the Faculty of Engineering-Mu'tah University in Jordan. Resource-Efficient Technologies, 3(4), 440-445.
14. Atmaca, İ., Yiğit, A., 2010. Güneş Enerjisi, Alfa Aktüel Yayınları, 43-46, Ankara.
15. Emeksiz, C., 2019. The Estimation of Diffuse Solar Radiation on Tilted Surface Using Created New Approaches with Rational Function Modeling. Indian Journal of Physics, 1-12.
16. Tırıs, M., Tırıs, Ç., Erdalli, Y., 1997. Güneş Enerjili Su Isıtma Sistemleri. Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, 61, Gebze-Kocaeli.
17. Mert, İ., Karakuş, C., 2015. Antakya Bölgesinde Rüzgâr Gücü Yoğunluğu ve Rüzgâr Hızı Dağılımı Parametrelerinin İstatistiksel Analizi, Politeknik Dergisi, 18(1), 35-42.
18. İlhan, A., Bilgili, M., Şahin, B., 2014. Efficiency Analysis of an Installed Wind Farm, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 133-140.
19. Green, MA., Hishikawa, Y., Warta, W., 2017. Solar Cell Efficiency Tables (version 50), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 25(7), 668-676.
20. Adam, A.D., Apaydin, G. 2016. Grid Connected Solar Photovoltaic System as a Tool for Green House Gas Emission Reduction in Turkey. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 1086-1091.
21. Apak, S., Atay, E., Tuncer, G., 2017. Renewable Hydrogen Energy and Energy Efficiency in Turkey in the 21<sup>st</sup> Century. International Journal of Hydrogen Energy, 42(4), 2446-2452.
22. Bilgili, M., Ozbek, A., Sahin, B., Kahraman, A., 2015. An Overview of Renewable Electric Power Capacity and Progress in New Technologies in the World. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 323-334.
23. Yağlı, H., Koç, Y., Koç, A., Görgülü, A., Tandiroğlu, A., 2016. Parametric Optimization and Exergetic Analysis Comparison of Subcritical and Supercritical Organic Rankine Cycle (ORC) for Biogas Fuelled Combined Heat and Power (CHP) Engine Exhaust Gas Waste Heat. Energy, 111, 923-932.
24. Yağlı, H., Karakuş, C., Koç, Y., Çevik, M., Uğurlu, İ., Koç, A., 2019. Designing and Exergetic Analysis of a Solar Power Tower System for Iskenderun Region. International Journal of Exergy, 28(1), 96-112.
25. Etier, I., Ababneh, M., Tarabsheh, A.A., 2011. Simulation of a 10 kW Photovoltaic System in Areas with High Solar Irradiation. American Journal of Applied Sciences, 8(2), 177.
26. Rai, A., Shrivastava, A., Jana, K.C., Tripathi, S., Agrawal, A., 2019. Feasibility Analysis of 100 kW Solar Plant for Chandigarh, India. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 594(1), 1-5.
27. Kumar, B.S., Sudhakar, K., 2015. Performance Evaluation of 10 MW Grid Connected Solar Photovoltaic Power Plant in India. Energy Reports, 1, 184-192.

## Araç Parçalarının MEMS Manyetometre Sensör Çıktısına Etkisi

Murat BAKIRCI\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tarsus Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay  
Mühendisliği Bölümü, Tarsus

Geliş tarihi: 11.11.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Birçok Akıllı Ulaşım Sistemi (AUS) için araçların yön bilgisinin hassasiyeti oldukça önemlidir. GPS-tabanlı konumlandırma ve yön tahmini neredeyse bütün ulaşım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat şehir merkezlerindeki çevresel etmenler nedeniyle GPS sinyali algılamasında tutarsızlıklar meydana gelmektedir. Mobil cihazlarda bulunan jiroskop, ivme ölçer, manyetometre gibi Mikroelektromekaniksel Sistem (MEMS) sensörleri, taşıt dinamiği ölçümlerinde oldukça güçlü bir potansiyele sahip olmak ile birlikte taşıtlarda yön tahmini ile ilgili çalışmalar yapabilmek için de oldukça elverişlidir. Akıllı mobil cihazlardaki manyetometre sensörleri, hassas yön tahmini yapabilmek için kullanışlı duruma getirilebilirler. Fakat manyetometre sensörü tarafından ölçülen manyetik alan verisi, taşıtın ferromanyetik parçaları nedeni ile ciddi şekilde deforme olmaktadır. Bu çalışmada, hata parametreleri saptanarak hassas olarak taşıt yön tahmininin nümerik olarak elde edilebileceği ortaya konmuştur. Hata parametreleri matematiksel bir modele dönüştürülerek etki eden hatalar ham sensör verisinden elimine edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre modelin ürettiği maksimum hata %3.4'tür.

**Anahtar Kelimeler:** Taşıt yön tahmini, Manyetometre, Ferromanyetik nesne, MEMS sensör, Akıllı ulaşım sistemleri

### Effect of the Components of a Vehicle on a MEMS Magnetometer Sensor Output

#### Abstract

Precise vehicle heading information is of great importance for many Intelligent Transportation Systems (ITS) applications. GPS-based localization and heading estimation is widely used in almost every transportation systems. However, dense urban environment causes inconsistency in the reception of the GPS signals. Given the diverse sensors within mobile devices, i.e., Microelectromechanical System (MEMS) sensors such as gyroscope, accelerometer, magnetometer etc., they have a strong potential for sensing vehicle dynamics and can promote a broad range of applications associated with heading estimation. A magnetometer sensor of a smart mobile device can be utilized to obtain accurate vehicle heading estimation. However, ferromagnetic components of a vehicle significantly deforms the magnetic field measured by magnetometer sensor. In this study, it is demonstrated that an accurate vehicle heading estimation can numerically be achieved through identifying error parameters. These parameters were then transformed into a mathematical model and contributing errors were eliminated from raw sensor output. Simulation results show that the model produces a maximum error of 3.4%.

**Keywords:** Vehicle heading estimation, Magnetometer, Ferromagnetic object, MEMS sensor, Intelligent transportation systems

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Murat BAKIRCI, [muratabakirci@tarsus.edu.tr](mailto:muratabakirci@tarsus.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

There are variety of techniques available to collect and analyze vehicle data in Intelligent Transportation Systems (ITS) perspective. Traditional data collection techniques have some prominent disadvantages such as high installation and maintenance cost [1]. On the other hand, modern smart mobile devices, which embedded with Micro-electro-mechanical system (MEMS)-based low cost Inertial Measurement Unit (IMU) sensors such as accelerometer, magnetometer and gyroscope, have powerful computing and sensing capabilities. Using these devices in ITS applications have relatively eased the process of dynamic travel data and vehicle data collection.

Due to their significant contributions to the applications in various fields, such as industrial, aerospace, automotive, military, the usage of magnetometer sensors is exponentially increasing. A MEMS magnetometer can facilitate constant and high navigation data rates which put forward itself as a key component for a wide range of applications. The primary reason to develop these sensors was to utilize them for navigation purposes only. Accurate heading measurement of a vehicle is one of the most important parameter for many ITS applications such as automatic guidance and control [2]. In this context, a MEMS magnetometer sensor have become quite popular for the navigation of ground vehicles.

Magnetometer sensors can utilize the Earth's magnetic field as a bias field for detecting the presence of ferromagnetic objects. However, the magnetic flux generated by the ferromagnetic components of a vehicle remarkably deforms the Earth's magnetic field around the vehicle [3-5]. Moreover, certain type of components may also produce a permanent magnetization effect.

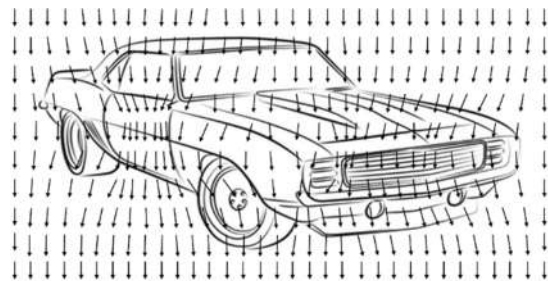
In the literature, various techniques have been reported for the calibration of magnetometer sensors in the magnetic field domain [6-8]. This study utilizes a magnetometer sensor by identifying error parameters which affect the

sensor readings. Factors that influence magnetic field in a vehicle such as, car body shell and power cables, were transformed into a mathematical representation, so that, contributing errors can be eliminated from raw sensor readings.

## 2. PROBLEM OVERVIEW AND THE METHODOLOGY

A MEMS magnetometer sensor simply measures the strength and direction of the local magnetic field. The magnetic field measured will be a combination of both the Earth's magnetic field and magnetic field created by nearby objects [9, 10]. Most magnetometer sensors are sensitive to magnetic field less than  $10 \text{ nT}$  within a  $\pm 200 \text{ } \mu\text{T}$  range. This sensitivity can be compared to the Earth's magnetic field which is roughly  $60 \text{ } \mu\text{T}$ .

Magnetometer sensors can utilize the Earth's magnetic field as a bias field for detecting the presence of ferromagnetic objects. The magnetic flux generated by the ferromagnetic components of a vehicle remarkably deforms the Earth's magnetic field around the vehicle [3-5]. Moreover, certain type of components may also produce a permanent magnetization effect. Most of the magnetic flux emanate from vehicle is generated by the large components such as engine, axles, driveshaft, among others. The body shell of a typical car also have a significant influence on the magnetic field [3, 11-14]. An illustration of the behavior of the Earth magnetic field around a typical vehicle is shown in Figure 1.



**Figure 1.** An illustration of the deformation of the Earth's magnetic field around a vehicle

As mentioned earlier, external magnetic influences cause distortional effects on the magnetic field of the Earth. These magnetic influences can be considered under two aspects: Hard iron and soft iron effects. In case of absence of distortion effects, a circle plot centered around origin is obtained from the resulting data (y-axis w.r.t. x-axis) while having a magnetometer rotated through a circle as shown in Figure 2 (a).

However, a hard iron effect for instance, produces a fixed amount of magnetic disturbance on the existing magnetic field, thus, results a certain amount of offset in the x or y direction. Therefore, the center of the circle plot no longer locates at the origin. On the other hand, the soft iron effect causes a deformation in the circle plot which results an ellipse. It is also likely that both effects will contribute to the total distortion simultaneously. The simultaneous compensation of both distortions will also be dependent on the motions of the distorting materials relative to the sensor. Thus, it is important to understand not only how compensation may be applied, but also to recognize those conditions under which effective compensation techniques are not possible.

Hard iron distortion, which caused by magnetized materials, generates a constant additive field to the magnetic field of the Earth. This additive field creates a constant offset from the origin of the magnetic field and it is independent from the position and orientation of the sensing platform. For instance, a speaker magnet induces a hard iron distortion. As long as the orientation and position of the magnet relative to the sensor is constant the field and associated offsets will also be constant. A hard-iron distortion can be visibly identified by an offset of the origin of the ideal circle from (0, 0), as shown in Figure 2 (b).

The hard iron effect can be eliminated from the sensor data through determination of x-axis and y-axis offsets and then subtracting from the raw sensor data. Prior to this process, tilt compensation must be applied if necessary. Hard-iron corrections are typically determined by rotating the sensor

through a minimum of 360°, then determining the distance from (0, 0) to the center of the circle by identifying the average of the maximum and minimum values for each of the axes, as shown in Eq. (1).

$$a = \frac{(x_{\max} + x_{\min})}{2}, \quad b = \frac{(y_{\max} + y_{\min})}{2} \quad (1)$$

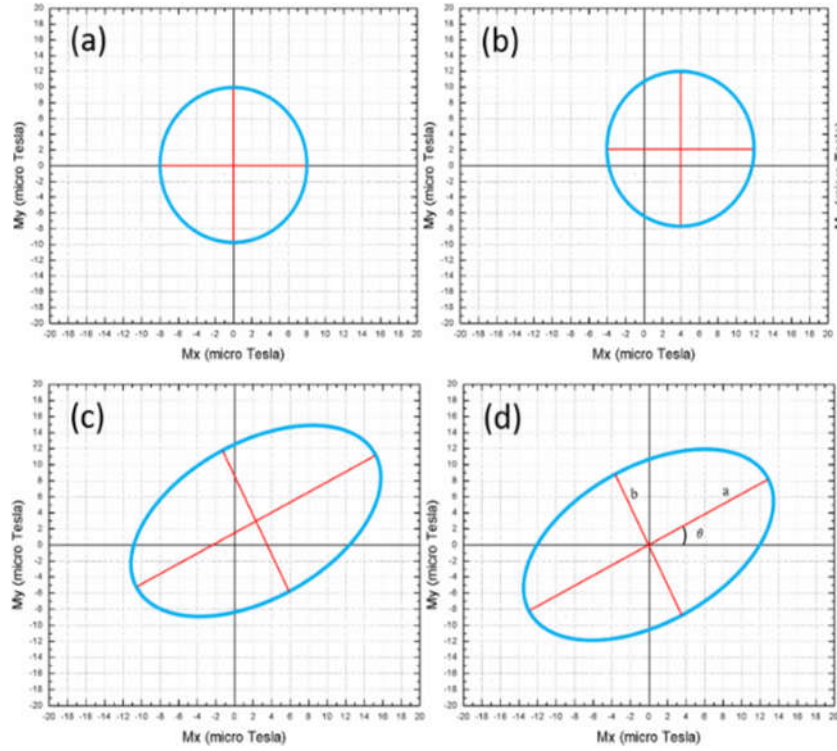
where  $a$  and  $b$  are X-axis and Y-axis offsets respectively. Once these constant offset values are computed, they can be eliminated from the raw magnetometer data.

Materials which effect an existing magnetic field but do not induce a magnetic field themselves, cause the soft iron distortion. Different from the hard iron distortion, the soft iron distortion is not additive. Materials such as iron, and nickel induce soft iron distortion. In contrast to hard iron distortion, the amount of distortion produced by soft iron materials is significantly depend on the orientation of the material relative to the sensor and the magnetic field. Therefore, it cannot be eliminated from the raw data with a simple constant. Figure 2 (c) illustrates the deformation in the ideal data caused by the soft iron distortion.

Compensating for soft iron distortion is computationally more intensive than compensating for hard iron distortion. Furthermore, it might be more effective from a cost and efficiency perspective to eliminate the soft iron materials from the proximity of the sensor.

It is first assumed that either the sensor is not tilted and there is no magnetic material to cause hard iron distortion or these two effects have already been eliminated. But if otherwise, the elimination of these distortions must be made prior to soft iron correction. At that point, it is logical to assume that the center of the ellipse is at origin as shown in Figure 26.

Identifying  $\theta$  in Figure 2 (d) is accomplished by using Eq. (2) to calculate the magnitude of the line segment  $a$ , followed by Eq. (3) to determine  $\theta$ :



**Figure 2.** A graph of ideal distortion-free magnetometer data (a); magnetometer data displaying hard-iron distortion (b); soft iron effect distorting the ideal circle into an elliptical shape (c); an ellipse generated as a result of soft iron distortion, centered at (0,0) with a rotation angle of  $\theta$

$$a = \sqrt{(x_1)^2 + (y_1)^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{y_1}{a}\right) \quad (3)$$

Next, the following rotation matrix is applied to the x and y components of the raw sensor values to rotate the ellipse. At that point, the major and minor axes of the ellipse will be aligned with the coordinate frame.

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$v_1 = Rv \quad (5)$$

It is now possible to scale the major axis such that the ellipse is converted to an approximate circle. The scale factor,  $\sigma$ , is determined using Eq. (6),

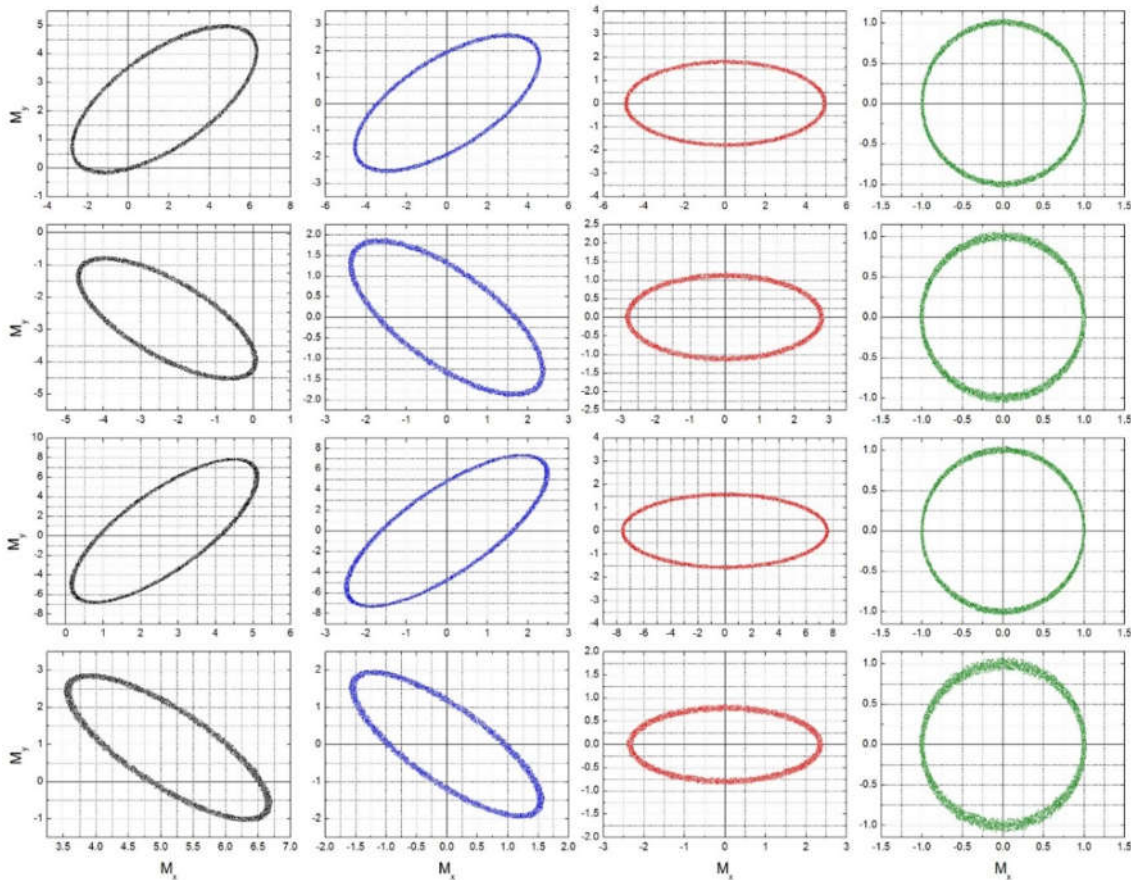
$$\sigma = \frac{b}{a} \quad (6)$$

Since all sensor readings suffer from internal and/or external parameters, it is quite necessary to transform these parameters into a mathematical model so that contributing errors can be eliminated from raw sensor readings through this model. A raw magnetometer sensor reading consists of two type of error sources which are instrumentation errors and magnetic distortion. Sensor sensitivity, bias, and misalignment can be considered as instrumentation errors. Other magnetic influences such as hard iron and soft iron effects can be categorized into magnetic distortion errors.

Considering these magnetic distortions and instrumentation errors along with a fixed noise,  $\gamma$ , the complete linear mathematical model for a magnetometer sensor can be expressed as [8]:

$$\begin{bmatrix} h_{tx} \\ h_{ty} \\ h_{tz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -m_z & m_y \\ m_z & 1 & -m_x \\ -m_y & m_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{s_{xx}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{s_{yy}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s_{zz}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} & d_{xz} \\ d_{yx} & d_{yy} & d_{yz} \\ d_{zx} & d_{zy} & d_{zz} \end{bmatrix} \times \left( \begin{bmatrix} h_{m_x} \\ h_{m_y} \\ h_{m_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{h_{ix}} \\ d_{h_{iy}} \\ d_{h_{iz}} \end{bmatrix} \right) + \gamma \quad (7)$$

where  $m_i$ ,  $s_{ij}$ , and  $d_{ij}$  represents misalignment, sensitivity, and soft iron correction matrices respectively.  $b_i$  and  $\gamma$  indicates bias and sensor noise respectively.



**Figure 3.** Results of four Monte Carlo simulations for various error parameters. Each row represents one simulation case and each column displays simulation steps

This expression defines the relationship between the true magnetic components, in other words Earth magnetic field components,  $h_{tx}$ ,  $h_{ty}$ ,  $h_{tz}$  and the raw magnetic sensor measurements  $h_{m_x}$ ,  $h_{m_y}$ ,  $h_{m_z}$ . Considering a two-dimensional drive, the two-dimensional form of the Eq. (7) has been used in the simulations.

### 3. IMPLEMENTATION OF THE MODEL

The performance of the magnetometer sensor model above, is tested through Monte Carlo simulation. In order to visualize the modification steps, three sets of error parameters were produced randomly and were

applied to the data which assumed to be the raw sensor readings. The results of four Monte Carlo simulations using  $3.6 \cdot 10^3$  sensor readings are plotted in Figure 3. In the figure, each row represents one set of simulation while columns display modification steps where first column depicts raw sensor readings. The misalignment error is neglected for this particular set of simulation since it requires a rigorous coordinate transformation and PCA analysis procedures which are out of the main concept of this study. In the second column, the ellipsoids obtained from raw sensor readings, are translated to the origin, thus, bias and hard iron effects are eliminated. Next, the ellipsoids are rotated along the z-axis by applying the soft iron matrix. Therefore the axes of ellipsoids are aligned with the coordinate axes which means that the soft iron effect is partially removed. Finally, applying the scale factor to the aligned data, the ellipses are converted into approximate circles as

shown in the last column.

In the second part of the simulation, only one set of error parameter is produced. The results of fifteen Monte Carlo simulation using  $3.6 \cdot 10^3$  sensor readings are presented in Table 1. The average bias estimation errors for x and y components of the magnetometer readings are 1.375  $\mu$ T and 1.157  $\mu$ T respectively while the maximum bias estimation error is 1.785  $\mu$ T. Considering the total sensor range, 60  $\mu$ T, these values indicate the total bias estimation errors for x and y components are 2.3% and 1.9% respectively. The average scaling and soft iron estimation errors for x and y components of the magnetometer readings are 2.072  $\mu$ T and 2.002  $\mu$ T respectively while the maximum error is 2.563  $\mu$ T. Similarly, the total scaling and soft iron errors for x and y components are 3.4% and 3.3% respectively.

**Table 1.** Model estimation errors

Simulation No.		Bias Est. Error (Micro Tesla)		Scale/Soft Iron Est. Error (Micro Tesla)
<b>I</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.369	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.983
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.018	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.916
<b>II</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	0.978	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.796
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.254	$\delta(s + d_{si})_Y$ 2.372
<b>III</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.695	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.782
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.027	$\delta(s + d_{si})_Y$ 2.269
<b>IV</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	0.877	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.912
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	0.959	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.767
<b>V</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.528	$\delta(s + d_{si})_X$ 2.296
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.475	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.807
<b>VI</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.785	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.873
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.581	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.603
<b>VII</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.336	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.941
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	0.823	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.652
<b>VIII</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	0.978	$\delta(s + d_{si})_X$ 2.169
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.508	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.883
<b>IX</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.562	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.776
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.537	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.969
<b>X</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.335	$\delta(s + d_{si})_X$ 2.321
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	0.927	$\delta(s + d_{si})_Y$ 2.425
<b>XI</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.446	$\delta(s + d_{si})_X$ 2.271
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	0.918	$\delta(s + d_{si})_Y$ 2.455
<b>XII</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.533	$\delta(s + d_{si})_X$ 2.433



		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.252	$\delta(s + d_{si})_Y$ 2.420
<b>XIII</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.497	$\delta(s + d_{si})_X$ 2.563
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.201	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.810
<b>XIV</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	1.735	$\delta(s + d_{si})_X$ 2.026
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	1.024	$\delta(s + d_{si})_Y$ 2.054
<b>XV</b>		$\delta(b + d_{hi})_X$	0.971	$\delta(s + d_{si})_X$ 1.944
		$\delta(b + d_{hi})_Y$	0.855	$\delta(s + d_{si})_Y$ 1.625

#### 4. CONCLUSIONS

Accurate heading estimation is an essential parameter for many ITS applications such as automatic guidance and control, and collaborative autonomous systems. The usage of MEMS magnetometer sensors is significantly increasing in variety of transportation applications due to their technical advantages over conventional sensors. Nevertheless, magnetometer sensor readings are suffered by ferromagnetic materials which generate a magnetic flux. This is indeed relatively lowers the quality of sensor output and makes accurate heading estimation impossible. In this work, error parameters such as, measurement noise and magnetic interference among others, were identified and transformed into a mathematical model, so that, contributing errors were eliminated from raw sensor readings. The performance of the magnetometer sensor model was tested via several Monte Carlo simulations. It is shown that a maximum of 2.563  $\mu\text{T}$  which corresponds to less than 4% heading estimation error was obtained through the simulations.

#### 5. REFERENCES

1. Abeygunawardana, T.D., 2014. Smart Data Collection Using Mobile Devices to Improve Transportation Systems, Dissertation, University of Nevada.
2. Kim, Y.C., Yun, K.H., Min, K.D., 2014. Automatic Guidance Control of An Articulated All-wheel-streed Vehicle, Vehicle System Dynamics, 52, 456-474.
3. Jackson, J.D., 1975. Introduction, Boundary Value Problems, Multipoles, Magnetostatics, Maxwell's Equations, 1<sup>st</sup> ed. NY, John Wiley & Sons, Inc., ch. 1-6.
4. Moron, C., Cabrera, C., Moron, A., Garcia, A., Gonzales, M., 2015. Magnetic Sensors Based on Amorphous Ferromagnetic Materials: A Review, Sensors, 15, 28340-28366.
5. Kahler, G.R., Torre, E.D., Vajda, F., 1992. Static Magnetic Field Deformation by a Ferromagnetic Body, IEEE Transactions on Magnetics, 28, 2274-2276.
6. Egziabher, D.G., Elkaim, G.H., Powell, J.D., Parkinson, B.W., 2006. Calibration of Strapdown Magnetometers in Magnetic Field Domain, Journal of Aerospace Engineering, 19, 87-102.
7. Foster, C.C., Elkaim, G.H., 2008. Extension of a Two-Step Calibration Methodology to Include Nonorthogonal Sensor Axes, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 44(3), 1070-1078.
8. Renaudin, V., Afzal, M.H., Lachapelle, G., 2010. Complete Triaxis Magnetometer Calibration in the Magnetic Domain, Journal of Sensors, 21, 1-10.
9. Solzbach, U., Wollschlager, H., Zeiher, A., Just, H., 1988. Optical Distortion Due to Geomagnetism in Quantitative Angiography, Proceedings of Computers in Cardiology, Washington, DC.
10. Macmillan, S., Ryeroft, M.J., 2010. The Earth's Magnetic Field, National Env. Res. Council, Online Encyclopedia of Aerospace Engineering, John Wiley & Sons, Inc.
11. Kittel, C., 2004. "Ferromagnetism and Antiferromagnetism" An Introduction to Solid State Physics, 8<sup>th</sup> ed. NY, John Wiley & Sons, Inc.
12. Low, L., Riddle, A., 2012. Simulation of the Effects of Vehicle Bodysshell on Low Frequency Magnetic Fields due to High Voltage Power Cables in Electric Vehicles, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Rome, Italy.
13. Wolff, J., Heuer, T., Gao, H., Weinmann, M.,

- Voit, S., Hartmann, U., 2006. Parking Monitor System Based on Magnetic Field Sensors, Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada.
14. Markevicius, V., Navikas, D., Zilys, M., Andriukaitis, D., Valinevicius, A., Cepenas, M., 2016. Dynamic vehicle detection via the use of magnetic field sensors, *Sensors*, 16, 1-9.

## Farklı Atık Malzemeler ile Stabilize Edilmiş İnce Daneli Zeminin Mühendislik Özellikleri

Firdevs UYSAL<sup>\*1</sup>, Vedat YILMAZ<sup>1</sup>, Hüseyin Mert TOPÇU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Niğde

Geliş tarihi: 08.11.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Dünya nüfusundaki artış endüstriyel atık malzemelerin artmasına neden olmaktadır. Endüstriyel atıkların stabilizasyonda katkı malzemesi olarak kullanımı, atıkların çevre üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için kullanılan bir çözümdür. Bu çalışmanın amacı, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve cam tozu ile stabilize edilmiş ince daneli zeminin mühendislik özelliklerini belirlemektir. İnce daneli zemin, kuru ağırlığının %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında atık malzeme kullanılarak stabilize edilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre, yüksek fırın cürufunun plastisite indisinin azaltılması ve drenajsız kayma mukavemetinin artırılmasında en etkili atık olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, artan silis dumanı oranı ve %20 atık oranından sonra yüksek fırın cürufu ile cam tozunun lineer rötreyi azalttığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin stabilizasyonu, Atık malzeme, İnce daneli zemin, Mühendislik özellikler

### Engineering Properties of Fine-Grained Soil Stabilized with Different Waste Materials

#### Abstract

The increment in world population leads to increase industrial waste materials. Utilization of industrial wastes as a stabilizing additive is a solution to reduce the negative impact of wastes on environment. The aim of this study is to determine variation of engineering properties of stabilized fine-grained soil with the use of fly ash, silica fume, blast furnace slag and glass dust. The soil was stabilized with using 10%, 20%, 30%, 40% and 50% waste contents of weight of dry soil. Test results showed that blast furnace slag is the most effective waste in terms of reduction of the plasticity index and increasing the undrained strength of soil. Furthermore, it was observed that linear shrinkage reduced with the increase in silica fume and blast furnace slag and glass dust content with %20 above.

**Keywords:** Soil stabilization, Waste material, Fine-grained soil, Engineering properties

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Firdevs UYSAL, [firdevsuysal@ohu.edu.tr](mailto:firdevsuysal@ohu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Günümüzde yaşamsal ve endüstriyel faaliyetler ile oluşan atıklar ve çevreye olumsuz etkileri kaçınılmazdır. Bu atık malzemelerin uzaklaştırılması ve depolanması önemli çevre problemleri yaratmaktadır. Gelişen teknolojiler ile atık ürünlerin yeniden üretime kazandırılması sağlanmakta ise de ekonomik ve kimyasal sebeplerle bir kısmı depolanmaktadır. Atık malzemelerin Batı Avrupa ve Amerika'da geri dönüşüm oranı %80 iken, bu oran Türkiye'de %20'dir. Bu nedenle, her yıl geri kazanılabilir malzemelerin büyük bir kısmı atık depolama sahalarına ya da çevreye gelişigüzel bırakılmaktadır. Problemler (oturma, şişme, çökme, sıvılaşma vb.) sahip zayıf zeminlerin çeşitli katkı malzemeler ile stabilizasyonu sıkça kullanılan iyileştirme yöntemlerindedir. Atık malzemelerin zemin iyileştirilmesinde kullanımı atıkların hem ekonomiye kazandırılması hem de çevreye olabilecek zararlı etkilerinin ortadan kaldırılmasına katkı sağlayacağından birçok araştırmacının ilgisini çekmektedir [1-3]. Katkı maddeleri olarak kireç, çimento, bitüm gibi malzemelerin yanı sıra, son yirmi yılda uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, cam tozu gibi endüstriyel atıkların bu amaç için kullanımı ön plana çıkmaktadır [4-7]. Bu malzemelerden silis dumanı silisyum metali veya ferro-silisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik fırınlarında yüksek saflıkta kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince malzemelerdir. Fırınların düşük sıcaklıklardaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO<sub>2</sub> olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur. Uçucu kül, kömürün tek başına termik santrallerde yakılması sırasında atmosfere bırakılmadan önce bacalardaki elektro filtreler sayesinde tutulan silt büyüklüğündeki malzemedir [8]. Dünyadaki enerji ihtiyacının artması ile kömür tüketimi artmaktadır ve kömür atığı olan uçucu kül miktarı da artmaktadır. Cüruf, metaller eritildiği zaman yüzeyde biriken daha hafif malzemelerdir. Atık olarak meydana çıkan bu malzemeler inşaat sektöründe çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [9]. Cam tozu, kullanılmayan cam malzemelerden

(şişe, pencere camı, vb.) oluşan atık bir malzemedir. Türkiye'de çok miktarda bulunan cam atıkları renk farklılığından dolayı geri dönüşümde çok kullanılamamaktadır [10]. Bu nedenle geri dönüştürülemeyen cam atıklarının yeniden kullanımı oldukça önemlidir [11].

Puzolanik malzemeler kendi başlarına bağlayıcılık özelliği hiç olmayan ya da oldukça az olan, ancak sulu ortamda bağlayıcılık özelliği kazanan silisli (SiO<sub>2</sub>) ve alüminli (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) malzemelerdir. Puzolan malzemeler doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırken, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü gibi malzemeler yapay puzolanlar olarak adlandırılmaktadır [12].

Zeminlerin kıvamı ince daneli zeminleri tanımlayan önemli parametrelerden biri olup, mühendislik davranışı üzerinde oldukça etkilidir. Kıvamın değişimi özellikle zeminlerin dayanımı ve taşıma gücünü etkilemektedir [13]. Kohezyonlu zeminler su muhtevasının değişmesi ile büyük hacimsel değişimler gösterir ve su muhtevasının artması ile yük taşıma direnci düşerken, büyük deformasyon gösterirler. Zeminlerin hangi su muhtevasında kıvamının ne olduğunu tespit etmek ve özellikle plastik ve likit kıvamlardaki su muhtevasının bilinmesi önemlidir. Zeminlerin yüksek plastisiteye sahip olması genel olarak, şişme ve sıkışma potansiyeline sahip olduğu, su geçirgenliğinin az olduğu ve çeşitli arazi işlemlerinde (kazı ve dolgu) sorunlar yaşanabileceği anlamına gelmektedir [14]. Bu nedenle stabilizasyon çalışmalarında zeminin plastisitesinin düşürülmesi hedeflenmektedir. Zeminin rötre limiti, zeminde su kaybının daha fazla hacim değişmesine neden olmayacağı su muhtevası olarak tanımlanır. Düşük rötre limitine sahip zeminlerin hacim değiştirme ihtimali yüksek olduğu için bu zeminlerde su muhtevastaki değişimler büyük hacim değişikliklerine neden olabilir ve bu tür zeminlerde rötre oldukça büyük önem kazanır.

Bu çalışmada, sanayi atıklarından uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve cam tozunun ince daneli zemin stabilizasyonundaki performansı değerlendirilmiştir. Farklı oranlarda (%10, %20, %30, %40 ve %50) zemine ilave edilen atıkların

zeminlerin kıvam limitleri, lineer rötre ve drenajsız kayma mukavemeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

## 2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

### 2.1. Malzeme ve Zemin Özellikleri

Bu çalışmada uçucu kül (UK), silis dumani (SD), yüksek fırın cürufu (YFC) ve cam tozu (CT) atıklarının ince daneli zemin stabilizasyonundaki performansları deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında iyileştirilen ince daneli zeminin mühendislik özellikleri tespit edilmiştir (Çizelge 1). Ayrıca, atık malzemeler temin edilerek bu atıkların kimyasal içeriği, dane dağılımı ve mikro yapısı tespit edilmiştir.

**Çizelge 1.** Doğal zemin özellikleri

USCS sınıfı	CL
Likit limit (%)	38
Plastik limit (%)	24
Plastisite İndisi	14
Özgül ağırlık	2.62

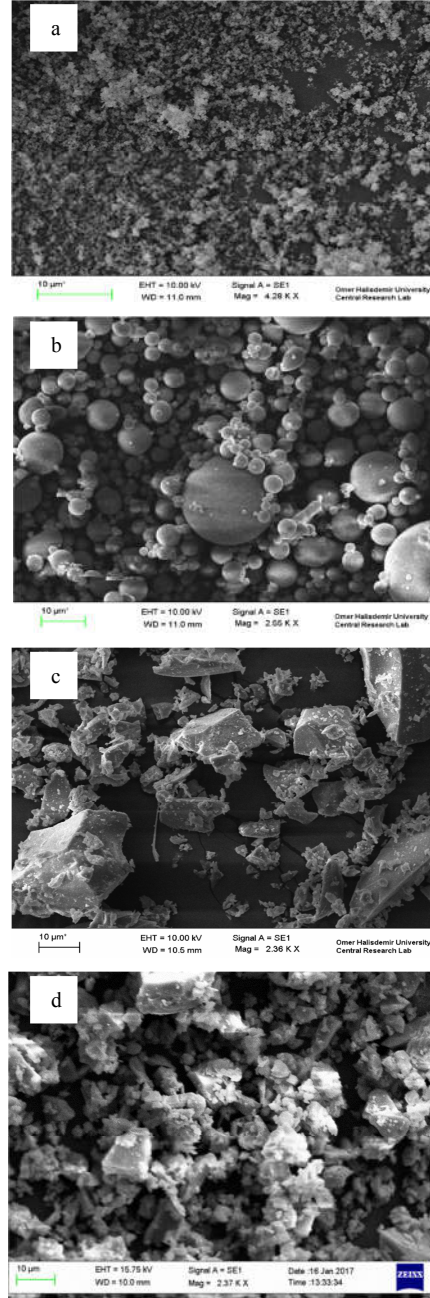
Atık malzemelerin kimyasal içeriğinin tespiti için XRF (X-Ray Fluorescence) analizleri yapılmıştır (Çizelge 2).

**Çizelge 2.** Atık malzemelerin kimyasal içeriği

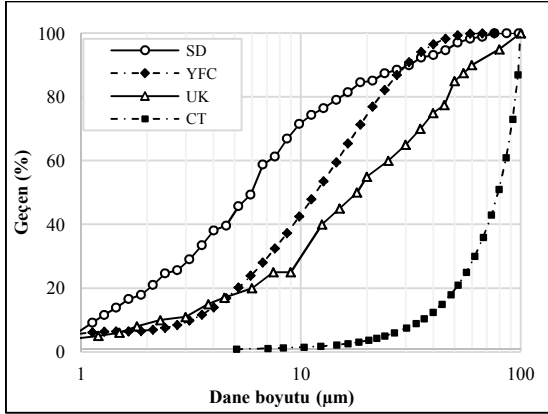
	UK	SD	YFC	CT
SiO <sub>2</sub>	61,252	93,534	36,824	71,79
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,193	0,778	13,314	1,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,018	0,881	0,727	0,11
CaO	1,472	0,547	38,834	9,89
MgO	1,702	0,794	5,648	4,10
K <sub>2</sub> O	2,335	0,995	0,777	0,20
TiO <sub>2</sub>	0,897	-	0,761	-
SO <sub>3</sub>	0,056	0,113	0,562	0,23
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,068	0,06	1,17	-
Na <sub>2</sub> O	0,272	0,404	-	12,41
ZnO	0,019	0,012	0,001	-
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,023	0,003	0,005	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05	0,002	0,016	-
BaO	0,133	-	0,157	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,192	0,088	0,009	-

Atık malzemelerin mikro yapısının belirlenmesi için SEM (Scanning Electron Microscopy)

analizleri yapılmıştır (Şekil 1). Atık malzemelerin dane dağılım eğrisi de tespit edilmiştir (Şekil 2).



**Şekil 1.** SEM Görüntüleri; (a) silis dumani (b) uçucu kül (c) yüksek fırın cürufu (d) cam tozu



Şekil 2. Atık malzemelerin dane dağılım eğrisi

## 2.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda dört farklı atık malzeme (UK, SD, YFC ve CT) ağırlık olarak %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ince daneli zemine karıştırılarak, atık türü ve atık oranlarının endeks ve mukavemet özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Plastik limit değeri ASTM D 4318 [15] standardına uygun olarak el ile yuvarlama yöntemi ile elde edilirken, likit limit değeri de BS 1377-2 [16] standartlarına uygun olarak yarı otomatik düşen koni deneyi ile elde edilmiştir (Şekil 3). Düşen koni deneyinde 30° ve 80 gram özelliğine sahip konik uç kullanılmıştır. Düşen koni deneyindeki batma miktarı ve zeminin drenajsız kayma mukavemeti arasındaki ilişki ilk olarak Hansbo [17] tarafından yapılmıştır (Eşitlik 1). Ayrıca, Hansbo [17] bu çalışmada koni faktörünü (K) tanımlamıştır. Bu faktör esas olarak koni uç açısına bağlı olup, Wood [18] bu faktörü 0.85 olarak önermiştir.

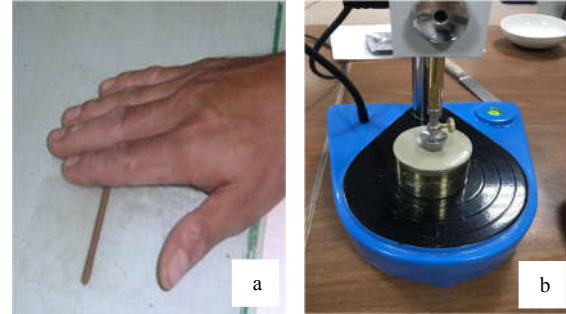
$$S_u = \frac{K * Q}{h^2} \quad (1)$$

$S_u$ = Drenajsız kayma mukavemeti (kN/m<sup>2</sup>)

K= Hansbo koni faktörü

Q= Koni ağırlığı

h= Koni batma miktarıdır (mm)



Şekil 3. Kıvam limitleri deneyleri: (a) plastik limit deneyi (b) düşen koni deneyi

Lineer rötre (tek eksenli büzülme) deneyi TS 1900-1 [19] standardına uygun olarak tüm atık oranları için tekrar edilmiştir (Şekil 4). Deneyde likit limit kıvamında hazırlanan zemin ve atık karışımı deney kalıbında yerleştirilerek, 110±5 °C sıcaklıkta 24 saat bekletilerek numune meydana gelen boy değişimi ölçülmüştür ve tek eksenli büzülme değeri hesaplanmıştır (Eşitlik 2).



Şekil 4. Lineer rötre deneyi

$$L_s = \left(1 - \frac{L}{L_0}\right) 100 \quad (2)$$

$L_s$ = Tek eksenli büzülme değeri

$L_0$ = Numunenin ilk uzunluğu

L= Fırında kurutulmuş numune uzunluğu

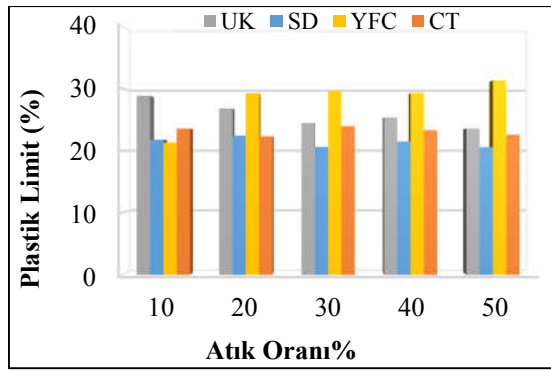
## 3. DENEYSEL SONUÇLAR

Çalışma kapsamında elde edilen laboratuvar sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

### Kıvam Limitleri Deneyleri

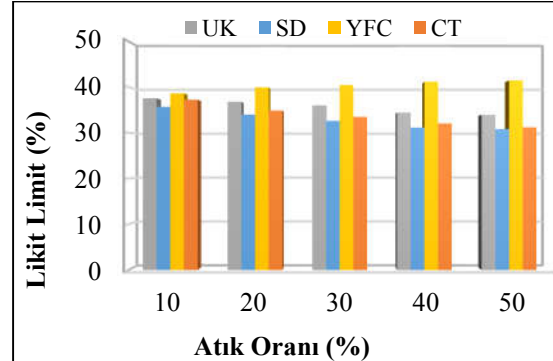
Farklı atık ve atık oranları ile plastik limit, likit limit ve plastisite indisi değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır (Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7).

Artan atık oranları ile UK ve SD plastik limit değerleri azalmış, YFC değerinde artış görülürken, CT plastik limit değerinde belirgin bir değişim görülmemiştir (Şekil 5). Uçucu kül için elde edilen sonuçlar Savran [20], Amadi [21] ve Totiç [22] ile benzerdir.



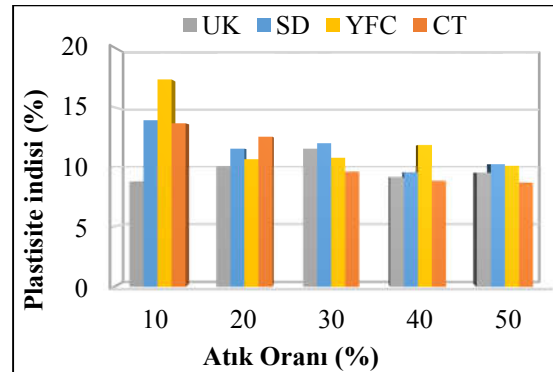
Şekil 5. Atık tür ve oranlarının plastik limite etkisi

Zemine ilave edilen artan atık oranları ile UK, CT ve SD'nin likit limitleri düşerken YFC için likit limit değerinde artışlar tespit edilmiştir (Şekil 6). Uçucu kül için elde edilen sonuçlar Yılmaz [23] ve Totiç [22] ile benzerdir. Likit limit değerindeki artışın ilk olası nedeni atık malzemelerin ilave edilmesi ile zemin danelerinin folikülasyonudur. Bu folikülasyon, folikül yapıdaki su tutma kapasitesini arttırmaktadır. Bu durum plastik limitteki değişimi de açıklamaktadır. Likit limitte meydana gelen azalma ise zemin danelerinin katyon değişimi esnasında dağılık katmanların baskılanmasından kaynaklanmaktadır [24]. Atık dane boyutu, temel olarak katyon değişimiyle kil partiküllerinin topraklanmasına neden olan bazı kimyasal reaksiyonları etkilemektedir [25]. Bu çalışmada kullanılan atıkların dane boyutu dağılım özellikleri birbirinden farklıdır. Kıvam limitlerindeki değişimin olası bir diğer nedeni de atıkların dane boyutu dağılımından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. Atık tür ve oranlarının likit limite etkisi

Artan atık oranları ile genel olarak CT, SD ve YFC atıklarının plastisite indisinde azalma olurken, UK için %30 oranına kadar artış sonrasında azalma tespit edilmiştir (Şekil 7). Killi zeminlerde plastisite indisinin az olması istenen bir durumdur [26]. CT, SD ve YFC atıklarının genel trendinin plastisite indisini azaltma yönünde olduğu görülmektedir. UK atığının ise uygun oranda zemine karıştırılması ile benzer sonuçlar elde edilebilecektir. Kullanılan atıklar içinde plastisite indisini düşürmede en etkili atığın YFC olduğu tespit edilmiştir. Plastisite indisinin azalması ile de zeminin işlenebilirliği artacaktır.

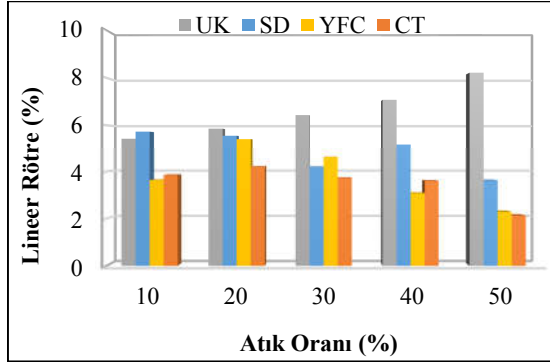


Şekil 7. Atık tür ve oranlarının plastisiteye etkisi

### Lineer Rötire Deneyleri

Artan atık oranları ile SD lineer rötreyi azaltırken, bu azalma YFC ve CT için, %20 oranından sonra gerçekleşmektedir. UK oranındaki artışlarda lineer rötrenin artmasına neden olmuştur (Şekil 8). Bose [27], artan UK miktarı rötire limitinin %3 oranında

artarken, lineer rötrenin de azaldığını tespit etmiştir.

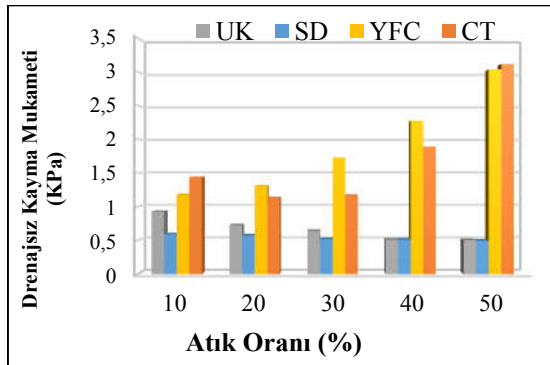


Şekil 8. Atık tür ve oranlarının lineer rötreye etkisi

#### Drenajsız Kayma Mukavemetinin Tespiti

Tüm atık tür ve oranları %40 su muhtevası ile hazırlanarak düşen koni deneyleri yapılmış ve bu su içeriğindeki batma miktarları tespit edilmiştir. Hansbo [17] bağıntısı ile drenajsız kayma mukavemeti değerleri hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

Artan atık oranları ile UK ve SD atıklarının drenajsız kayma mukavemetlerinde azalma görülürken, YFC ve CT'de ise artışlar meydana gelmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Atık tür ve oranlarının anlık mukavemete etkisi

En belirgin mukavemet artışı YFC'de tespit edilmiştir. Çetin [12] UK için optimum karışım oranının %10 olduğunu bundan daha fazla UK

oranlarında drenajsız kayma mukavemetinde düşmelerin olduğunu belirtmiştir. Tumluer [28], cüruf katkısı ile hazırlanan numune dayanımının zamana bağlı olarak artış göstereceğini belirtmiştir. Aksoy ve arkadaşları [29], puzolanik özellikli malzeme dayanımındaki artışın genellikle 90 günde belirginleştiğini ifade etmiştir. Puzolanik etkinin de göz önünde alınmasıyla, bu çalışma kapsamında yapılan anlık dayanımların zamana bağlı olarak artış gösterebileceği düşünülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında kullanılan UK, SD, YFC ve CT atıklarının değişen oranlarla ince daneli zemine ilave edilmesi ile zeminin kıvam, lineer rötreye ve drenajsız kayma mukavemeti özelliklerindeki değişim araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Artan atık oranları ile UK ve SD atıkları plastik limiti azalırken, YFC atığı plastik limiti arttırmış ve CT atığı ise plastik limit değerinde belirgin bir değişime neden olmamıştır.
- Artan UK, CT ve SD oranları ile zeminin likit limiti azalırken, YFC likit limiti arttırmaktadır.
- Artan atık oranları ile genel olarak CT, SD ve YFC atıkları plastisite indisini azaltmıştır. UK atığında ise %30 oranına kadar plastisite indisinde artış olurken, sonrasında azalma tespit edilmiştir.
- Plastisite indisinin azaltılmasında en etkili atığın YFC olduğu tespit edilmiştir. Plastisite indisinin azaltılması da zeminin işlenebilirliğini arttıracaktır.
- SD oranının artması ile lineer rötreye azalırken, YFC ve CT atıkları için %20 oranından sonra azalma gerçekleşmektedir. UK atığının artması ise lineer rötrenin artmasına neden olmuştur.
- Artan atık oranları ile UK ve SD drenajsız kayma mukavemetinde azalmaya neden olurken, YFC ve CT mukavemetinde artışı sağlamıştır. En belirgin mukavemet artışı YFC atığında tespit edilmiştir.



## 5. KAYNAKLAR

1. Achmad, F., Nazmi, W.M., Fauzi U.J., 2011. California Bearing Ratio (CBR) Improvement of Kuantan Clay Subgrade By Using Reused Material as Stabilizer. 9th National Conference of the Indonesia Road Development Association (IRDA), Jakarta.
2. Abd El-Aziz, M.A., Abo-Hashema, M.A., 2013. Measured Effects on Engineering Properties of Clayey Subgrade using Lime-Homra Stabiliser. International Journal of Pavement Engineering, 14-4, 321-332.
3. James, J., Pandian P.K., 2018. Bagasse Ash as an Auxiliary Additive to Lime Stabilization of an Expansive Soil. Strength and Microstructural Investigation. Advances in Civil Engineering.
4. Senol, A., Edil, T.B., Bin-Shafique M.S, Acosta, H.A., Benson C.H., 2006. Soft Subgrades Stabilization by Using Various Fly Ashes. Resources, Conservation Recycling, 46(4), 365-376.
5. Singh, P.S., Yadav, R.K., 2014. Effect of Marble Dust on Index Properties of Black Cotton Soil. International Journal of Scientific Research Engineering & Technology, 158-163.
6. Saygılı, A., 2015. Use of Waste Marble Dust for Stabilization of Clayey Soil. Materials Science, 21(4), 601-606.
7. Öncü, Ş., Bilsel, H., 2018. Utilization of Waste Marble to Enhance Volume Change and Strength Characteristics of Sand-Stabilized Expansive Soil. Environmental Earth Sciences, 77(12), 461.
8. Malhotra, V.M., Carrette, G.C., Sivassundaram, V., 1994. Role of Silica Fume in Concrete a Review, Advances in Concrete Technology, Canmet, Ottwa, 925-991.
9. Ünal, O., Güçlüer, K., 2016. Gazbeton Üretiminde Yüksek Fırın Cürufu Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Özel Sayı, 218-221.
10. Topcu, I.B., Canbaz, M., 2004. Properties of Concrete Containing Waste Glass Cem. Concr. Res, 34, 267-274.
11. Turgu, P., 2008. Limestone Dust and Glass Powder Wastes as New Brick Material. Materials and Structures, 41(5), 805-813.
12. Çetin, A.Y., 2011. Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
13. Yılmaz, L., 2002. Killi Zeminlerde Kıvam Limitleri ve Kompaksiyon Parametrelerinin Isı ile Değişimi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.78, Erzurum.
14. Palalı, A., 2006. Handere Kilinde Su İçeriği Değişimi ve Kompaksiyon Enerjisinin Mukavemete Olan Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.98, Adana.
15. ASTM D 4318 2013. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA, USA.
16. BS 1377-2 1990. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Part 2, Classification Tests, BSI.
17. Hansbo, S., 1957. A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay by the Fall-Cone Test, Royal Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden, s.7-47.
18. Wood, D.M., 1985. Some Fallcone Tests. Geotech 35(1), 64-68.
19. TS 1900-1 2006. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
20. Savran, K.Z., 1988. Stabilization of Cohesive Soils With Fly Ash, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, s.62, Ankara.
21. Amadi, A., 2010. Evaluation of Changes in Index Properties of Lateritic Soil Stabilized With Fly Ash. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 9(17), 69-78.
22. Totiç, E., Göktepe, F., Yaşar, M., 2019. Uçucu Kül Katkısının Killi Zeminlerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10(2), 769-778.
23. Yılmaz, F., 2016. Zemin Stabilizasyonunda Uçucu Kül Kullanımı, ISEM2016, 3<sup>rd</sup>

- International Symposium on Environment and Morality, 4-6 November 2016, Alanya-Turkey.
24. Umesha, T.S., Dinesh, S.V., Sivapullaiah, P.V., 2009. Control of Dispersivity of Soil Using Lime and Cement. *International Journal of Geology*, 3(1), 8-16.
  25. Ji-ru, Z., Xing, C., 2002. Stabilization of Expansive Soil by Lime and Fly Ash. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 17(4), 73-77.
  26. Sivapullaiah, P.V., Sridharan, A., Bhaskar, R.K.V., 2000. Role of Amount and Type of Clay in the Lime Stabilization of Soils. *Ground Improv.*, 4, 37- 45.
  27. Bose, B., 2012. Geo Engineering Properties of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(1), 1339-1353.
  28. Tumluer, G., 2006. Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, s.161, Adana.
  29. Aksoy, H.S., Yılmaz, M., Akarsu, E.E., 2008. Killi Bir Zeminin Tunçbilek Uçucu Külü Kullanılarak Stabilizasyonu. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(3), 88-92.

## Non-linear Control of Inverted Pendulum

Serdar COŞKUN<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin

Geliş tarihi: 08.11.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Abstract

Presented is a study of non-linear control for an inverted pendulum system. The inverted pendulum system is a great example of an underactuated, non-minimum phase, and highly unstable system. The objective of this research paper is to derive non-linear control laws for an inverted pendulum system. First, dynamic equations of the inverted pendulum are derived by utilizing the Lagrange's equations and then it is linearized around an unstable upright position. Secondly, the corresponding analysis uses the standard linear stability arguments and the traditional Lyapunov method. The non-linear sliding mode control and feedback linearization control laws are then derived. The feedback linearization control law is used to transform the non-linear system into an equivalent linear system such that a suitable feedback control law can be proposed. The stabilization of the initial condition and reference tracking is studied in this paper. I demonstrate the effectiveness of the proposed non-linear control strategies using MATLAB/Simulink software.

**Keywords:** Non-linear control, Inverted pendulum system, Sliding mode control, feedback linearization

### Ters Sarkaç Sisteminin Doğrusal Olmayan Kontrolü

#### Öz

Sunulan bir ters sarkaç sistemi için doğrusal olmayan kontrol çalışmasıdır. Ters sarkaç sistemi eksik tahrikli, karma evreye sahip ve oldukça kararsız bir sistemin en önemli örneğidir. Bu araştırma makalesinin amacı, ters sarkaç sistemi için doğrusal olmayan kontrol yasaları elde etmektir. İlk olarak, ters sarkaçların dinamik denklemleri Lagrange denklemleri kullanılarak türetilir ve daha sonra kararsız dik pozisyon etrafında lineer kararlılık noktaları bulunur. Diğer adımda analizler için doğrusal kararlılık teorileri ve Lyapunov metodunu kullanır. Doğrusal olmayan kayan kipli kontrol ve geri beslemeli doğrusallaştırmış kontrol yasaları türetilir. Geri beslemeli doğrusallaştırmış kontrol yasası doğrusal olmayan sistemi eşdeğer bir doğrusal sisteme dönüştürmek için kullanılır, böylece uygun bir geri besleme kontrol yasaları önerilebilir. Başlangıç koşullarından kararlılık ve referans takibi bu makalede incelenmiştir. Önerilen doğrusal olmayan kontrol stratejilerinin kontrol performansı MATLAB/ Simulink programı ile gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Linear olmayan kontrol, Sarkaçlı araba sistemi, Kayan kipli kontrol, Geri beslemeli doğrusallaştırılmış kontrol

---

\* Sorumlu yazar (Corresponding author): Serdar COŞKUN, [serdarcoskun@tarsus.edu.tr](mailto:serdarcoskun@tarsus.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

Recently, the non-linear control theory has received increased attention due to its technical importance and impact on various fields of application. For instance, robotics is one major application for the non-linear control theory. In the robotics control system design, the inverted pendulum is important for modeling. A cart inverted pendulum system has been served as a general model for robotic systems. The cart pendulum system is a non-linear, under-actuated system with unstable zero dynamics and must be controlled such that the position is at its unstable equilibrium [1-5]. The most common method to perform the swing-up of an inverted pendulum is energy control where the energy of the system is controlled instead of directly controlling its position and velocity. As the inverted pendulum deviates from the vertical open-loop unstable position, the proposed control laws make the inverted pendulum a dynamic equilibrium.

Intelligent control methods are proposed in the literature based on non-linear model analysis. A neural network type learning control method is developed in [6]. The designed control deals with issues of delayed performance evaluation, learning under uncertainty, and the learning of non-linear functions with no prior knowledge of the dynamics. A fuzzy logic control with the Sugeno inference method is used for simultaneous control of the four-state variables including the angular position and the angular velocity of an inverted pendulum, cart position, and cart velocity around unstable equilibrium point as shown in work [7]. The works [8-9] present an optimal tuning of linear quadratic regulator (LQR) controller with the Bees Algorithm (BA) for a linear inverted pendulum system. The Bees Algorithm, which is a heuristic search algorithm, optimizes the weighting matrices of the LQR controller, and results are presented with simulation and experimental studies.

This paper aims to investigate a sliding mode control approach (SMC) and feedback linearization (FL) control approach for an inverted pendulum system and further compare the results. For the controller design view, the paper attempts

to perform and compare the sliding mode control and feedback linearization. The sliding mode control is a suitable approach for non-linear control system design [10-12] because it ensures good tracking despite the existence of a parameter uncertainty [13]. According to the switching control law, sliding mode control drives the state trajectory onto the sliding manifold defined by the state variables of the system. However, the switching process often causes a chattering problem for the system. The chattering problem excites undesired flexible dynamics that may cause system instability [14]. To solve this issue, we introduce a saturation function to mitigate the chattering effect while tracking along the sliding surface.

Feedback linearization is another popular method for non-linear control design [15-16]. By introducing a control input to eliminate the non-linear behavior of the system, one can consider the original system as a linear system and further perform linear control such as PID or PD control [17]. However, the drawback of feedback linearization is that it causes the system to behave contrarily to the original system due to its loss of non-linear response.

In this study, the derived control laws are employed to simultaneously balance the inverted pendulum and place the cart via four-state variables, the angular and velocity of the inverted pendulum, and the position and velocity of the cart. Initial condition stabilization and reference tracking performance are both demonstrated. The main contributions of this paper are to find explicit non-linear control laws for stabilization and tracking control of the inverted pendulum system. Results are discussed for the benefits of each technique.

This paper is structured as follows: Section 2 presents the non-linear system modeling of the pendulum-cart system and linearization around the equilibrium position. Section 3 shows nonlinear control methods sliding mode control, and feedback linearization along with the simulation results. Lastly, conclusions are drawn in Section 4.

## 2. SYSTEM MODELING

In this section, the dynamic model of the pendulum-cart system is derived. With the pin joint connecting the pendulum and the cart, constraint forces are existing in the system, therefore Lagrangian equations are preferred than the Newtonian method.

To apply Lagrangian equations, expressions for the kinetic and potential energies are determined as the cart undergoes translational motion while the pendulum experiences rotational motion. The horizontal displacement of the cart from the predefined zero position and the rotational displacement of the pendulum from the upright position. The only actuation in the system is the external force exerted on the cart. The inverted pendulum system has two degrees of freedom. From the geometry (Figure 1),  $x$  stands for horizontal displacement of the cart,  $\theta$  is for the rotation of the pendulum. with  $M$  (kg) is the cart mass,  $m$  (kg) is the mass of the pendulum,  $L$  (m) is the length of the pendulum  $g$  ( $\frac{m}{s^2}$ ) is the acceleration of gravity. For simplicity, the time dependency on  $t$  is omitted. Continuous time differential equation is written for the inverted pendulum system in the form of:  $\dot{x}=f(x,u)$ , where  $x \in \mathbb{R}$  is the state vector,  $u \in \mathbb{R}$  is the manipulated control input. The parameters of the inverted pendulum are given as follows:

$$M=6 \text{ kg}, m=2 \text{ kg}, L=1 \text{ m}, g=9.81 \frac{m}{s^2}$$

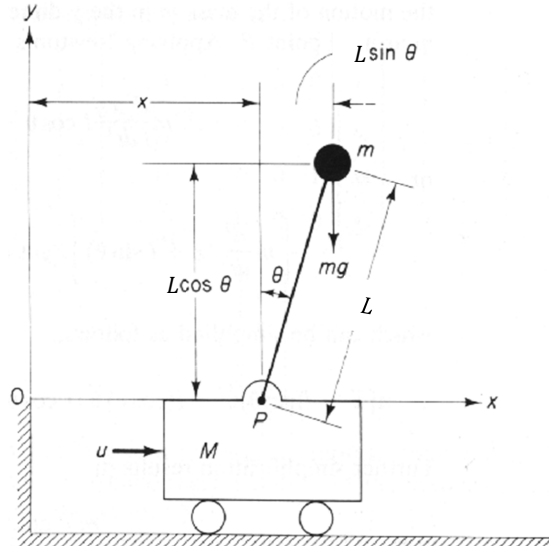
We initiate the non-linear modeling of the inverted pendulum system using Lagrangian mechanics. The kinetic energy can be expressed as (Equations 1-3).

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}_c^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2) \quad (1)$$

where

$$x_c = \text{displacement of cart} = x, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_p = \text{horizontal displacement of COM of pendulum} = x + L \sin \theta, \\ y_p = \text{vertical displacement of COM of pendulum} = L \cos \theta, \end{cases} \quad (3)$$



**Figure 1.** Pendulum-cart system geometry and the corresponding velocities are (Equations 4 and 5).

$$\dot{x}_c = \dot{x}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_p = \dot{x} + L \cos(\theta) \dot{\theta}, \\ \dot{y}_p = -L \sin(\theta) \dot{\theta}, \end{cases} \quad (5)$$

making the kinetic energy as (Equation 6):

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + L^2 \dot{\theta}^2 + 2L \cos(\theta) \dot{\theta} \dot{x}) \quad (6)$$

Meanwhile, the potential energy can be expressed as (Equation 7):

$$V = mgy_p = mgL \cos(\theta) \quad (7)$$

Now the Lagrangian is formulated as follows (Equation 8):

$$L = T - V = \frac{1}{2} (M+m) \dot{x}^2 + \frac{1}{2} mL^2 \dot{\theta}^2 + mL \cos(\theta) \dot{\theta} \dot{x} - mgL \cos(\theta) \quad (8)$$

After choosing  $x$  and  $\theta$  as the generalized coordinates, the Lagrange's equations become (Equations 9-10):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = u. \quad (10)$$

Through some algebraic manipulations Equations 9-10, two governing equations of motion are (Equation 11):

$$\begin{cases} ML^2 \ddot{\theta} + mL \cos(\theta) \ddot{x} - mgL \sin(\theta) = 0, \\ (M+m) \ddot{x} + mL \cos(\theta) \ddot{\theta} - mL \sin(\theta) \dot{\theta}^2 = u. \end{cases} \quad (11)$$

or equivalently the following standard form (Equation 12)

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) = f. \quad (12)$$

Where

$$q = \begin{bmatrix} \theta \\ x \end{bmatrix}, \quad M(q) = \begin{bmatrix} ML^2 & mL \cos(\theta) \\ mL \cos(\theta) & M+m \end{bmatrix},$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -mL \sin(\theta) \dot{\theta} & 0 \end{bmatrix},$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} -mgL \sin(\theta) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} 0 \\ u \end{bmatrix}$$

Notice that the states are coupled and apparently there is only one control in one channel of the actuation vector  $f$ , meaning that the system is underactuated and difficult to control. Recall that  $\theta$  is the pendulum angle,  $\dot{\theta}$  is the pendulum angle velocity,  $x$  is the cart displacement and  $\dot{x}$  is the cart velocity. For the control purpose, four state variables are defined as  $(x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T = (\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x})^T$  to form the compact non-linear state space equations as follows (Equation 13):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(M+m)g \sin(\theta)}{(M+m \sin^2(\theta))L\theta} & -\frac{m \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\theta}}{M+m \sin^2(\theta)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{mg \cos(\theta) \sin(\theta)}{(M+m \sin^2(\theta))\theta} & \frac{mL \sin(\theta) \dot{\theta}}{M+m \sin^2(\theta)} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\cos(\theta)}{(M+m \sin^2(\theta))L} \\ 0 \\ \frac{1}{M+m \sin^2(\theta)} \end{bmatrix} u \quad (13)$$

## 2.1. Equilibrium and Stability Analysis

The equilibria points of the cart-pendulum system are obtained to be (Equation 14):

$$\begin{cases} x_{1e} = k\pi, \\ x_{2e} = 0, \\ x_{3e} = \alpha, \\ x_{4e} = 0. \end{cases} \quad (14)$$

where  $k \in \mathbb{Z}$  and  $\alpha \in \mathbb{R}$

Even though the system has infinite equilibria mathematically, physically, the equilibria are the upright and the pendant positions of the pendulum with an arbitrary cart displacement. Due to the intended application of the model to robotic system control, the equilibrium of the pendent position (when is an odd number) is not discussed.

To investigate the stability of the equilibria, the Jacobian linearized model around the equilibrium  $(0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$  is derived directly from the state space equations, which yields, (Equation 15)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (15)$$

where

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(M+m)g}{ML} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{mg}{M} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{ML} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix}$$

Since there are two zero eigenvalues and two real eigenvalues with opposite signs, this equilibrium in both the linearized system and the original non-linear system is unstable.

## 2.2. Performance Analysis

The closed-loop performance of a control system is measured based on a performance index. In this work, we use 3 difference indices for reference tracking error (of the derived SMC and FL control laws). The performance indices are:

- 1) Integral of the squared value of the error (ISE):

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt.$$

- 2) Integral of the absolute value of the error (IAE):

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt.$$

- 3) Integral of the time-absolute value of the error (ITAE):

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt.$$

## 3. NON-LINEAR CONTROLS AND RESULTS

### 3.1. Sliding Mode Control

Non-linear systems have inherently been hard to control due to the unexpected responses. The sliding mode controllers have successfully been implemented to the non-linear plant models to achieve the prescribed control and performance

objectives. The main idea behind the SMC is that the dynamics of non-linearity is altered by a discontinuous control signal that forces the system to the sliding surfaces. Some of the main advantages of SMC are robustness, faster convergences, and reduced-order controller dynamics. In the scope of this paper, the SMC is capable of controlling the pendulum angle over all operating range. To this end, our design objective is upswing control of the pendulum from the initial condition and to hold the pendulum at a particular angle from the upright position.

The SMC control law is defined as follows:

We first define the dynamics of the pendulum as: (Equations 16-18)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= h(x) + g(x)u. \end{aligned} \quad (16)$$

where

$$h(x) = \frac{(M+m)g \sin(\theta) - mL \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\theta}^2}{(M+m \sin^2(\theta))L}, \quad (17)$$

$$g(x) = -\frac{\cos(\theta)}{(M+m \sin^2(\theta))L} \quad (18)$$

A sliding surface for the non-linear system is given (Equation 19)

$$s = \lambda x_1 + x_2 \quad (19)$$

$\lambda$  denotes the distance of the state from the sliding surface. In our design,  $\lambda$  is selected to be 3. Assume the corresponding positive definite Lyapunov function with a negative definite derivative along the system trajectories (Equations 20 and 21)

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (20)$$

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(\lambda \dot{x}_1 + \dot{x}_2) = s(\lambda x_2 + h(x) + g(x)u) < 0 \quad (21)$$

Then we define the non-linear control law that is applied to the system (Equation 22):

$$u(t) = \frac{1}{g(x)} (-\lambda x_2 - h(x)) - K \text{sign}(\lambda x_1 + x_2) \quad (22)$$

Further arrangements led to (Equation 23)

$$u = \frac{(M+m\sin^2(\theta))L}{\cos(\theta)} \left( -\lambda \dot{\theta} - \frac{(M+m)\text{g}\sin(\theta) - mL\sin(\theta)\cos(\theta)\dot{\theta}^2}{(M+m\sin^2(\theta))L} \right) - K \text{sign}(\lambda\theta + \dot{\theta}) \quad (23)$$

Note that we design the control law only for the pendulum angle and velocity. This control law guarantees the upward position and stabilization of the pendulum. However, it has no effects on the cart position and velocity. Therefore, another sliding mode control law, using a sliding surface  $s = \beta x_1 + x_2$  and repeating the computations in Equations 20-22, is found and applied to the cart (Equation 24)

$$u = \frac{(M+m\sin^2(\theta))}{\cos(\theta)} \left( -\beta \dot{x} + \frac{m\text{g}\cos(\theta)\sin(\theta) - mL\sin(\theta)\dot{\theta}^2}{M+m\sin^2(\theta)} \right) - K \text{sign}(\beta x + \dot{x}) \quad (24)$$

where  $\beta$  is chosen as 5.  $\lambda$  and  $\beta$  can be realized as sliding surface convergence speed and the best running performance is observed with the selected values. To verify and compare the performance of the proposed control law, the inverted pendulum simulation system is built in MATLAB/Simulink. The first design purpose is to stabilize the pendulum at upward position for a given initial condition. We chose the initial pendulum angle as  $0.2 * \pi = (36^\circ)$  and let the system reach the equilibrium position.

It is obvious that the designed control drives the system to the equilibrium within a reasonable amount of time (3 secs) in Figure 2 and Figure 3. The notorious problem with this control is that the chattering in the control input. This because the switching control law depends on the system state

value, which strives to drive the states to the sliding surface that can never reach to the surface exactly. It is quite harmful to the mechanical systems. Figure 4 demonstrates the situation.

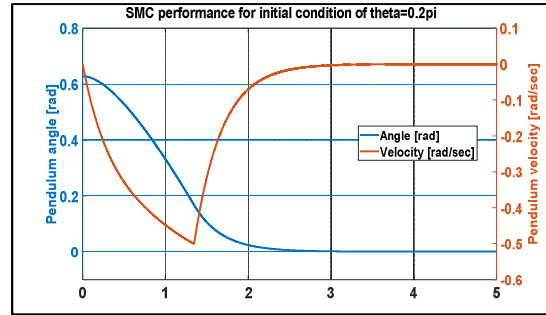


Figure 2. Stabilization of pendulum angle and velocity

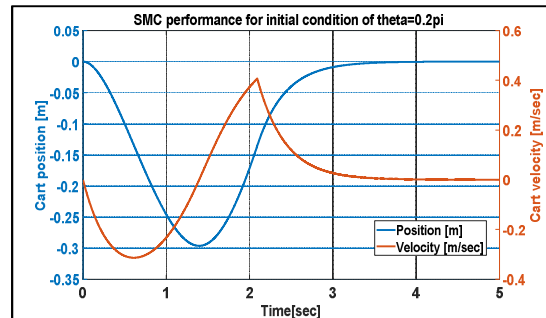


Figure 3. Stabilization of cart position and velocity

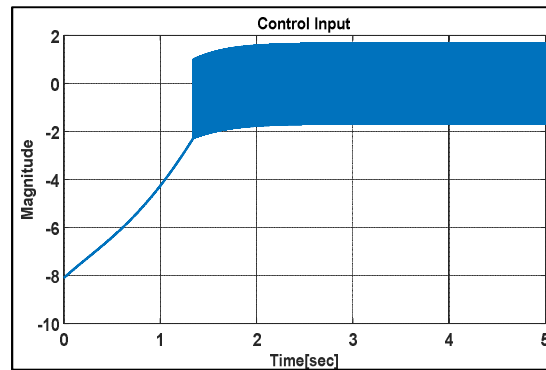


Figure 4. Control input

The performance measures of this control law in reference tracking (Figure 10) are stated as follows: the integral squared error (ISE) is 8.194,



integral absolute error (IAE) is 4.91, and the integral time-absolute error (ITAE) is 17.13.

One way of eliminating this undesired behavior of the control input is to introduce a tolerance band,  $\epsilon$ , (saturation function) around the sliding surface. When  $\epsilon=0.7$ , the following figures demonstrate the results.

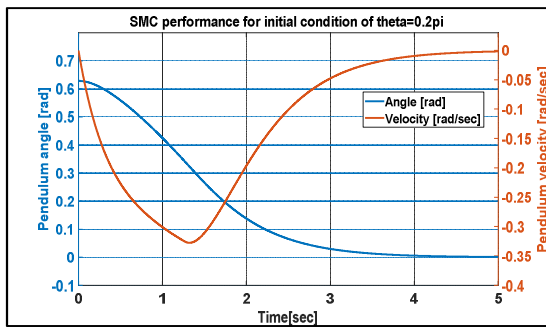


Figure 5. Stabilization of pendulum angle and velocity with  $\epsilon=0.7$

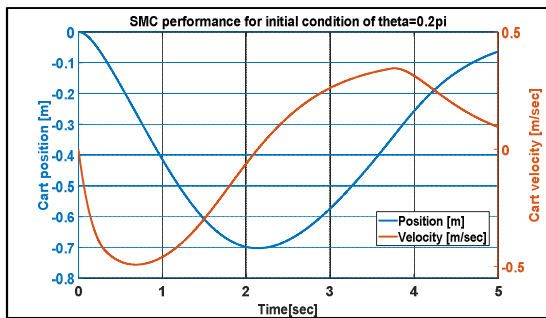


Figure 6. Stabilization of cart position and velocity  $\epsilon=0.7$

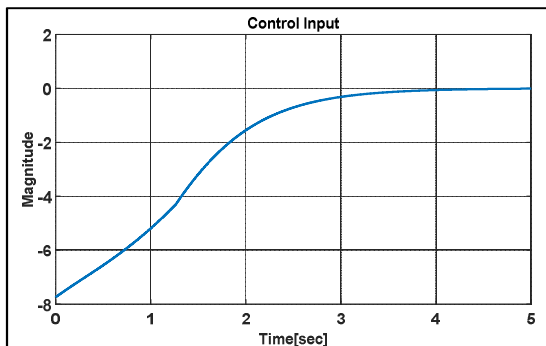


Figure 7. Control input  $\epsilon=0.7$

It is explicitly shown that the chattering effect on the control input is successfully eliminated. However, the settling time has increased in Figures 5 and 6. It is seen that there is always a trade-off on the control design in Figure 7.

For the sake of demonstration, we also plot the phase plane portraits of the non-linear system with and without saturation function.

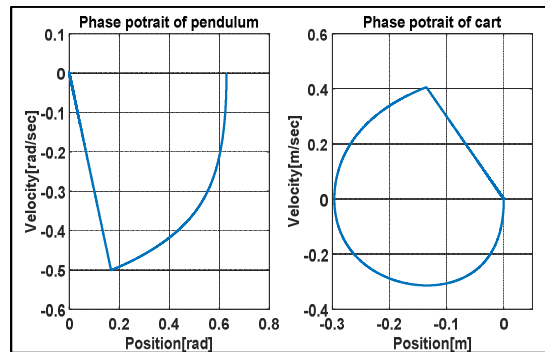


Figure 8. Phase portraits of SMC

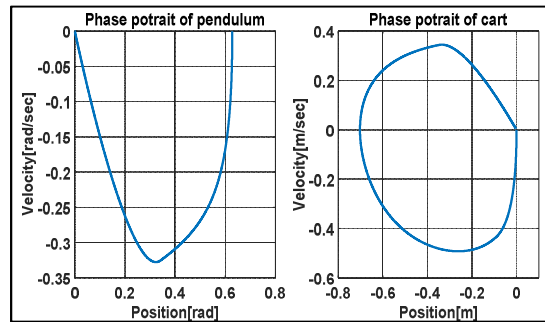


Figure 9. Phase portraits of SMC with  $\epsilon=0.7$

Figure 8 shows the improved convergence of the position and velocity for the pendulum and cart with a sharp path. However, Figure 9 has softer convergence map over the trajectories.

We now go further and test the designed controller for a given position of the pendulum. We set the angle  $\theta=0.095*\pi=0.3$  ( $17.2^\circ$ ). At 2 seconds the pendulum position is set to  $17.2^\circ$ . We avoid having a sharp reference following. It takes 2 seconds for the pendulum to settle at the desired position in Figure 10. Chattering effect of the controller is displayed in the same figure as well.

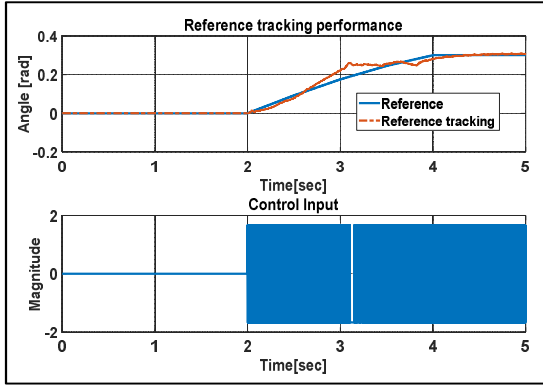


Figure 10. Constant reference tracking of SMC

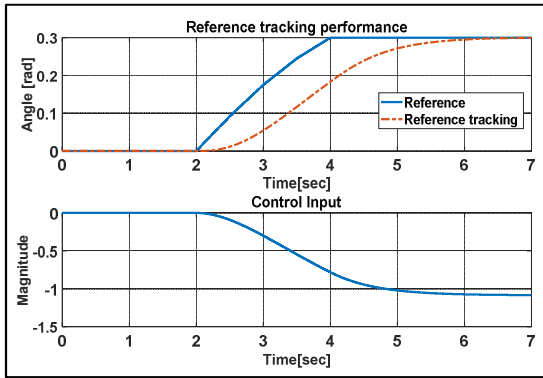


Figure 11. Constant reference tracking of SMC  $\varepsilon = 0.7$

The tracking performance of controller with a saturation tolerance of  $\varepsilon=0.7$  is also tested. As expected, small deviation occurs around the set position of the pendulum. The controller achieves to balance the pendulum at the desired position in a longer time period, seen in Figure 11.

The performance measures of SMC with  $\varepsilon = 0.7$  are stated as follows: the integral squared error (ISE) is 0.0009469, integral absolute error (IAE) is 0.05336, and the integral time-absolute error (ITAE) is 0.1986.

### 3.2. Feedback Linearization Control

Feedback linearization (FL) control transforms a non-linear system dynamics into a linear dynamics so that the linear control methods can be applied. We employ the input-output linearization for the

non-linear plant. We first derive the input to the pendulum angle feedback linearization, the pendulum displacement is considered as output. The control objective is to regulate the pendulum at the upright position. It is seen that the internal dynamics of the system is unstable. Even though the input to the pendulum angle control law stabilizes the pendulum position in an upright direction, it has no control for the displacement of the cart. In the upcoming steps, we also derive the input to the cart displacement control law to be able to regulate the entire closed-loop dynamics. We first write down the system Equations 25-28:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (25)$$

$$y = h(x) \quad (26)$$

where

$$f(x) = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \frac{(M+m)g\sin(\theta) - mL\sin(\theta)\cos(\theta)\dot{\theta}}{(M+m\sin^2(\theta))L} \\ \dot{x} \\ \frac{-mg\cos(\theta)\sin(\theta) + mL\sin(\theta)\dot{\theta}}{M+m\sin^2(\theta)} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\cos(\theta)}{(M+m\sin^2(\theta))L} \\ 0 \\ \frac{1}{M+m\sin^2(\theta)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

#### 3.2.1. Lie Derivative

Consider a scalar function  $h : D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  and define a vector field  $f : D \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ . The Lie derivative of  $h$  with respect to  $f$ , denoted  $L_f h$ , is given by

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x)$$

And the output is chosen to be the angular displacement of the pendulum (Equation 29):

$$h(x) = x_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Then, we can now take the Lie derivate of the output function until the control input appears (Equation 30):

$$\dot{h} = \frac{\partial h}{\partial x} \dot{x} = L_f h + L_g h u = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [f(x)] + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [g(x)] u = x_2, \quad (30)$$

Taking the second derivative in subsequent step results in (Equations 31 and 32):

$$\ddot{h} = \frac{\partial \dot{h}}{\partial x} \dot{x} = L_f^2 h + L_f L_g h u = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} [f(x)] + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} [g(x)] u. \quad (31)$$

$$\ddot{h} = \ddot{\theta} = \frac{(M+m)g \sin(\theta) - mL \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\theta}^2}{(M+m \sin^2(\theta))L} - \frac{\cos(\theta)}{(M+m \sin^2(\theta))L} u. \quad (32)$$

The linearizing control law is chosen as (Equations 33 and 34):

$$u = \frac{1}{L_f L_g h} (-L_f^2 h + v), \quad (33)$$

$$u = -\frac{(M+m \sin^2(\theta))L}{\cos(\theta)} \left( \frac{-(M+m)g \sin(\theta) + mL \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\theta}^2}{(M+m \sin^2(\theta))L} + v \right) \quad (34)$$

$v$  is being the new control input variable and can

be chosen as  $v = [K_1 \quad K_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$  with  $K_1 = K_2 = 20$

in our control design. The relative degree is 2. When the the output is chosen to be the cart displacement we have (Equation 35):

$$h(x) = x_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (35)$$

We take the Lie derivate of the output function one more time until the control input appears (Equation 36):

$$\dot{h} = \frac{\partial h}{\partial x} \dot{x} = L_f h + L_g h u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [f(x)] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} [g(x)] u = x_4 \quad (36)$$

Taking the second derivative leads to (Equations 37 and 38):

$$\ddot{h} = \frac{\partial \dot{h}}{\partial x} \dot{x} = L_f^2 h + L_f L_g h u = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [f(x)] + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [g(x)] u. \quad (37)$$

$$\ddot{h} = \ddot{x} = \frac{-mg \cos(\theta) \sin(\theta) + mL \sin(\theta) \dot{\theta}^2}{M+m \sin^2(\theta)} + \frac{1}{M+m \sin^2(\theta)} u \quad (38)$$

The linearizing control law is chosen as (Equations 39 and 40):

$$u = \frac{1}{L_f L_g h} (-L_f^2 h + v) \quad (39)$$

$$u = \frac{(M+m \sin^2(\theta))}{\left( \frac{mg \cos(\theta) \sin(\theta) - mL \sin(\theta) \dot{\theta}^2}{M+m \sin^2(\theta)} + v \right)} \quad (40)$$

with  $v = [K_3 \ K_4] \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$  with  $K_3 = K_4 = 20$  in

our control design. Our design objective with the feedback linearization control laws is upswing control of the pendulum from the initial condition and to hold the pendulum at a particular angle from the upright position.

Note that we use same initial condition for the pendulum angle ( $0.2 * \pi$ ). The results are shown in Figures 12-14.

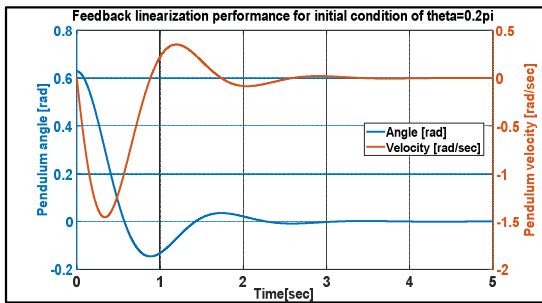


Figure 12. FL stabilization of pendulum angle and velocity

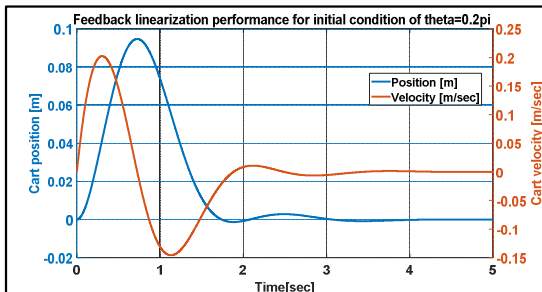


Figure 13. FL stabilization of cart displacement and velocity

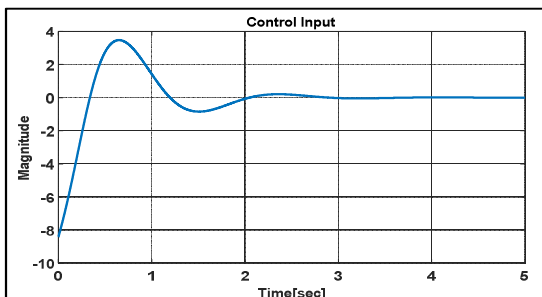


Figure 14. FL control input

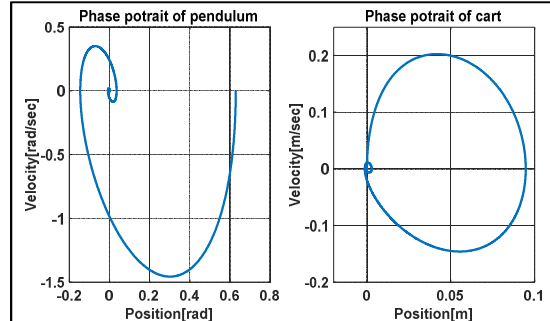


Figure 15. Phase portraits of FL control

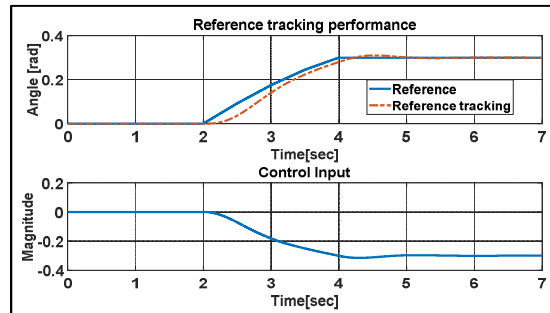


Figure 16. Constant reference tracking and control input of FL control

We make observations on how the states evolve differently than the ones in sliding mode control. Using high control gains for the FL controlled case, we see an overshoot on the control input but fast convergence of the states from the initial conditions (Figures 12 and 13). There is always a trade-off between the desired performance vs. the control action the control design step, illustrated in Figure 14. Phase portraits of the pendulum-cart are shown in Figure 15. Next, we provide a reference angle ( $17.2^\circ$ ) at 2 seconds and let the controller follow the reference angle within 2 seconds in Figure 16. Even though there is a deviation along the trajectory, the control does an appealing job. The feedback linearization control law closed-loop system performance can also be measured in terms of performance indices. The performance measures are stated as follows: the integral squared error (ISE) is 0.0004306, integral absolute error (IAE) is 0.03057, and the integral time-absolute error (ITAE) is 0.1016. As observed, the best performance is attained with the derived feedback

linearization control law for the pendulum-cart system.

#### 4. CONCLUSION

Non-linear control of an inverted pendulum-cart system is presented in this paper. Firstly, the derivation of non-linear differential equations with the stability analysis of equilibrium positions is carried out. Then, two control methods are proposed for the problem. The first one is sliding mode control, which indeed performs a good stabilization and trajectory tracking as expected. One drawback of the SMC is the chattering effect, for which a saturation tolerance is proposed to eliminate the negative impacts on the control input. The second approach is the feedback linearization method that nicely transforms the non-linear system into a linear one, making all types of linear control techniques feasible. It has been demonstrated that the designed non-linear controllers are successfully implemented and the results obtained are quite satisfactory.

#### 5. REFERENCES

1. Chanchareon, R., Sangveraphunsiri, V., Chantranuwathana, S., 2006. Tracking Control of an Inverted Pendulum Using Computed Feedback Linearization Technique. In 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics 1-6, IEEE.
2. Du, L., Cao, F., 2015. Nonlinear Controller Design of the Inverted Pendulum System based on Extended State Observer. In 2015 International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering. Atlantis Press.
3. Zare, A., Lotfi, T., Gordan, H., Dastranj, M., 2012. Robust Control of Inverted Pendulum Using Fuzzy Sliding Mode Control and Particle Swarm Optimization Pso Algorithm. International Journal of Scientific & Engineering Research, 3(10), 1-5.
4. Brisilla, R.M., Sankaranarayanan, V., 2015. Nonlinear Control of Mobile Inverted Pendulum. Robotics and Autonomous Systems, 70, 145-155.
5. Stellet, J. Control of an Inverted Pendulum
6. Anderson, C.W., 1989. Learning to Control an Inverted Pendulum Using Neural Networks. IEEE Control Systems Magazine, 9(3), 31-37.
7. Gani, A., Kececioglu, O.F., Acikgoz, H., Sekkeli, M., 2017. Fuzzy Logic Controller Design Based on Sugeno Inference Method for Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System. Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences-Sigma Muhendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 8(1), 19-30.
8. Şen, M.A., Bilgiç, H.H., Kalyoncu, M., 2016. Çift Ters Sarkaç Sisteminin Denge ve Konum Kontrolü için Arı Algoritması ile Lqr Kontrolcü Parametrelerinin Tayini. Mühendis ve Makina, 57(679), 53-62.
9. Bilgiç, H.H., Sen, M.A., Kalyoncu, M., 2016. Tuning of LQR Controller for an Experimental Inverted Pendulum System Based on the Bees Algorithm. Journal of Vibroengineering, 18(6), 3684-3694.
10. Köse, E., Abacı, K., Kızmaz, H., Aksoy, S., Yalçın, M.A., 2013. Sliding Mode Control Based on Genetic Algorithm for WSCC Systems Include of SVC. Elektronika ir Elektrotehnika, 19(4), 25-28.
11. Köse, E., 2017. Controller Design by Using Non-linear Control Methods for Satellite Chaotic System. Electrical Engineering, 99(2), 763-773.
12. Irfan, S., Mehmood, A., Razzaq, M.T., Iqbal, J., 2018. Advanced Sliding Mode Control Techniques for Inverted Pendulum: Modelling and Simulation. Engineering Science and Technology, an International Journal, 21(4), 753-759.
13. Grossimon, P., Barbieri, E., Drakunov, S., 1996. Sliding Mode Control of an Inverted Pendulum, System Theory, Proceedings of the Twenty-Eighth Southeastern Symposium, ISBN 0-8186-7352-4, pp.248-252, 31 Mar - 02 Apr 1996 IEEE.
14. Naik, M., Cochran, D., 2012. System Identification of an Inverted Pendulum on a Cart using Compressed Sensing, Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), 2012 Conference Record of the Forth Sixth Asilomar Conference, pp.426-430, 4-7 Nov 2012 IEEE.

15. de Jesús Rubio, J., 2018. Robust Feedback Linearization for Nonlinear Processes Control. *ISA Transactions*, 74, 155-164.
16. Moreno-Valenzuela, J., Aguilar-Avelar, C., 2018. Feedback Linearization Control of the IWP. In *Motion Control of Underactuated Mechanical Systems*, 141-158, Springer, Cham.
17. Bugeja, M., 2003. Non-linear Swing-up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System. In *The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool*, 2, 437-441, IEEE.

## Art Arda Farklı Mesafelerde Bulunan İki Binanın Akış Analizi

Ahmet FERTELLİ\*<sup>1</sup>, Mehmet BALTA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sivas

<sup>2</sup>Amasya Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine Bölümü, Amasya

Geliş tarihi: 09.12.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Bu çalışmada, farklı ara mesafelerde art arda iki yerleştirilen binalar için rüzgarın etkileri üç boyutta sayısal olarak hesaplanmıştır. Sayısal hesaplamada ANSYS-FLUENT 14.0 programı kullanılmıştır. Sivas için meteorolojik veriler göz önüne alınarak ortalama rüzgar hızı belirlenmiş ve türbülans modeli olarak RNG k-ε kullanılmıştır. Hesaplamalar sonucunda, binalar arasındaki mesafenin artırılmasıyla arka bina etrafındaki akış yapısı ve girdap alanlarının etkilendiği görülmüştür. Ayrıca, ilk binanın ön yüzeylerinde en yüksek pozitif basınç katsayıları olduğu, B, C ve D yüzeylerinde ise negatif basınç katsayılarının olduğu gözlenmiştir. Arka binada sadece çatı seviyesinde pozitif basınç görünüyor iken, diğer tüm yüzeylerde tüm yükseklikler için negatif basınç katsayıları elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar yükü, Bina basınç katsayısı, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, Akış yapısı

### Flow Analysis of Two Consecutive Buildings at Different Distances

#### Abstract

In the present paper, the effects of wind were calculated numerically in three dimensions for buildings placed in two consecutive different distances. ANSYS-FLUENT 14.0 program was used for numerical calculation. According to meteorological data for Sivas, the average wind speed was determined and RNG k-ε was used as the turbulence model. As a result of the calculations, it was seen that the flow structure and vortex areas around the rear building were affected by increasing the distance between the buildings. In addition, the highest positive pressure coefficients were observed on the front surfaces of the first building and negative pressure coefficients were observed on the B, C and D surfaces. In the rear building, only positive pressure was seen at the roof level, while negative pressure coefficients were obtained for all heights on all other surfaces.

**Keywords:** Wind load, Building aerodynamic, Building pressure coefficient, CFD, Flow structure

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet FERTELLİ, [fertelli@cumhuriyet.edu.tr](mailto:fertelli@cumhuriyet.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek ve birden fazla binadan oluşan, modern yaşam alanlarının sayısı artış göstermektedir. Söz konusu yaşam alanların planlaması yapılırken bina ile rüzgar etkileşimi göz önüne alınarak binalar konumlandırılmalıdır. Binalar üzerinde rüzgarlar nedeniyle oluşan farklı şiddetlerdeki basınç alanları çatı ve yüzeyler üzerinde çeşitli hasarlar oluşturabilmektedir. Ayrıca rüzgarların sebep olduğu girdap grupları, binalarda titreşim ve gürültüye de sebep olmaktadır. Bu olumsuz parametreler, bina konumlarının değiştirilmesi, farklı bina gruplarının yerleşim düzenleri ve bina tasarımlarının değiştirilmesi ile düzeltilebilir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürdeki yapılan deneysel ve sayısal araştırmalardan, Nitinas ve arkadaşları [1], farklı 3D türbülans modellerinin geçerliliğinin sağlanması için kemerli tip, eğimli tip ve düz tip olmak üzere üç farklı çatı modeli için kontrollü hava akımı koşulları oluşturularak rüzgar tüneline deneyler yapılmıştır. Deneysel hız ölçümleri bir Laser Doppler Anemometre ile yapılarak, çatı geometrileri üzerindeki dış hava akımı alanı ve binalar ardındaki hız dağılımı ve türbülanslı kinetik enerji dağılımları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle standart k-ε, RNG k-ε ve gerçekleştirilebilir k-ε modelleri, hız dağılımlarında uyumlu sonuçlar elde edilmiş olup, binaların çatısında ortalama değerlerle karşılaştırıldığında daha yüksek değerler elde edilmiştir. Özmen ve arkadaşları [2], farklı çatı eğimlerine sahip binalar üzerindeki akış yapısını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Çatı açısı eğimleri 15°, 30° ve 45° olarak belirlenmiş ve yapılan analizler sonucunda çatı eğiminin 15° olması durumunda emme kuvvetinin en fazla olduğu tespit edilmiştir. Rajasekarababu ve arkadaşları [3] 0° ve 90° iniş açılarının olduğu 300:1 ölçekli yüksek bina modeli etrafındaki akışın bir türbülans modeli kullanarak açık arazi koşulunda CFD ile çözmüşlerdir. Elde edilen çözümler rüzgar tüneline deney ölçümleri ile doğrulanmıştır.

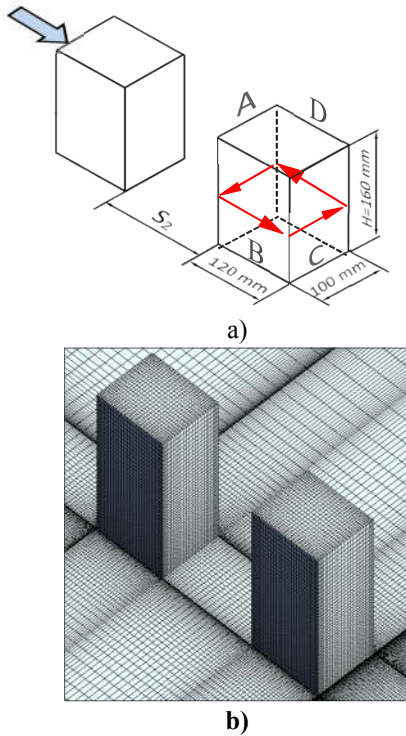
Sonuçlarda aşağı rüzgar etkilerinin yükseklik boyunca artan rüzgar basıncı dağılımı ile bastırıldığı görülmektedir. Rüzgar tüneli ölçümleriyle karşılaştırıldığında, rüzgar basıncı katsayılarının ( $C_p$ ) maksimum sapması CFD'de %12 olarak bulunmuştur. Ayrıca, CFD simülasyonu binanın genişliğine bağlı olarak ölçülen üç boyutlu bir düzlemde rüzgar akış desenlerini, yeniden dolaşımın boyutunu, uyanma ayrılma bölgelerini ve hız profillerini göstermektedir. Wang ve arkadaşları [4] gölgelik çatılı bir binanın çatısı üzerindeki akış şekli, rüzgar kapasitesi ve rüzgar enerjisini araştırmıştır. Farklı yükseklikler, çıkıntılar ve gölgelik tavanının eğim açıları kullanılarak bir referans binanın çatısı üzerindeki akış dağılımının oluşturduğu maksimum rüzgar potansiyeli belirlendi. Sonuçlarda düz gölgelik altında bir değişim olmadığı, çıkıntı eklendiğinde çok az değişim olduğu, üçgen gölgelik modellerinde ve eğim açısının 20° olması durumunda rüzgar dağılımının en iyisi olduğu bulunmuştur. Lee ve arkadaşları [5] hedef bina etrafındaki katmanları radyal mesafelere göre belirleyerek rüzgar akışından binaların nasıl etkilendiği araştırmıştır. Kopenhag şehir merkezinde hedef bina hakkında yarıçaplar 100 m, 150 m, 200 m ve 250 m olarak belirlenerek, CFD analizinde k-türbülans modeli ile çözümler yapılmıştır. Araştırma, çevre yapı katmanlarının rüzgar karakteristiği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Chen ve arkadaşları [6] yüksek katlı bir binanın, alçak katlı bir bina ile beraber yerleştirilmesi durumunda binalar üzerindeki rüzgar etkilerini araştırmak için rüzgar tüneline rüzgar basıncı ölçümleri yapmıştır. Sonuçlarda, alçak katlı binanın yüksek katlı bina önüne yerleştirilmesi durumunda, alçak katlı binanın çatısında pozitif basınçların oluştuğunu, iki bina arasındaki mesafenin azaltılması veya yüksek binanın katsayısının artırılmasının pozitif basınç değerlerini artırdığını göstermiştir.

Bu çalışmada, farklı mesafedeki art arda iki bina modeli etrafındaki akış yapıları incelenmiştir. Analizler binalar etrafındaki akım çizgisi, hız vektörü ve türbülans kinetik enerji değişimlerini sunmaktadır [7].



### 3. MATERYAL VE METOT

Çalışma yapılan apartman her katta 4 daireden oluşan toplamda 12 katlı apartman dairedir. Bina modellemesinde, bina boyutları 1/250 oranında küçültülerek model bina 120×100×160 mm (H) boyutlarında tasarlanmıştır [7]. Şekil 1’de gösterildiği gibi art arda konumlandırılan iki bina ara mesafesi  $S_2$ , olarak tanımlanmış 0,5 H ve 0,75 H olmak üzere iki farklı mesafe için sayısal hesaplamalar yapılmıştır.

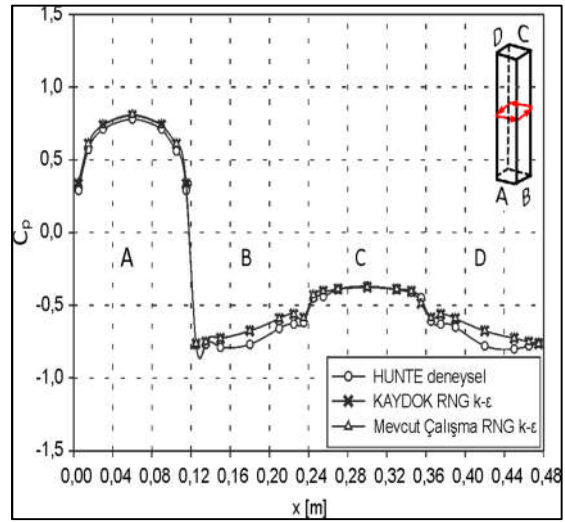


Şekil 1. Bina modeli ve ağ yapısı

Analizlerde ortalama hız değeri, Sivas İli için 10 yıllık meteoroloji ortalama değerlerinden 12 m/s olarak elde edilmiş ve Reynolds sayısı ise 179000 olarak hesaplanmıştır. Nümerik hesaplamalar için ANSYS-FLUENT 14.0 programı kullanılmıştır [8]. Üç boyutlu yapılan çözümlerinde  $S_2=0,5 H$  mesafeli modelde 3500000 ve  $S_1=0,75H$  ara mesafeli modelde ise 3600000 dörtgen eleman (Şekil 1b) kullanılmıştır. Analizlerde akış türbülanslı olduğu için RNG k- $\epsilon$  türbülans modeli ve Standart Duvar Fonksiyonu tercih edilmiştir.

### 4. SAYISAL SONUÇLAR

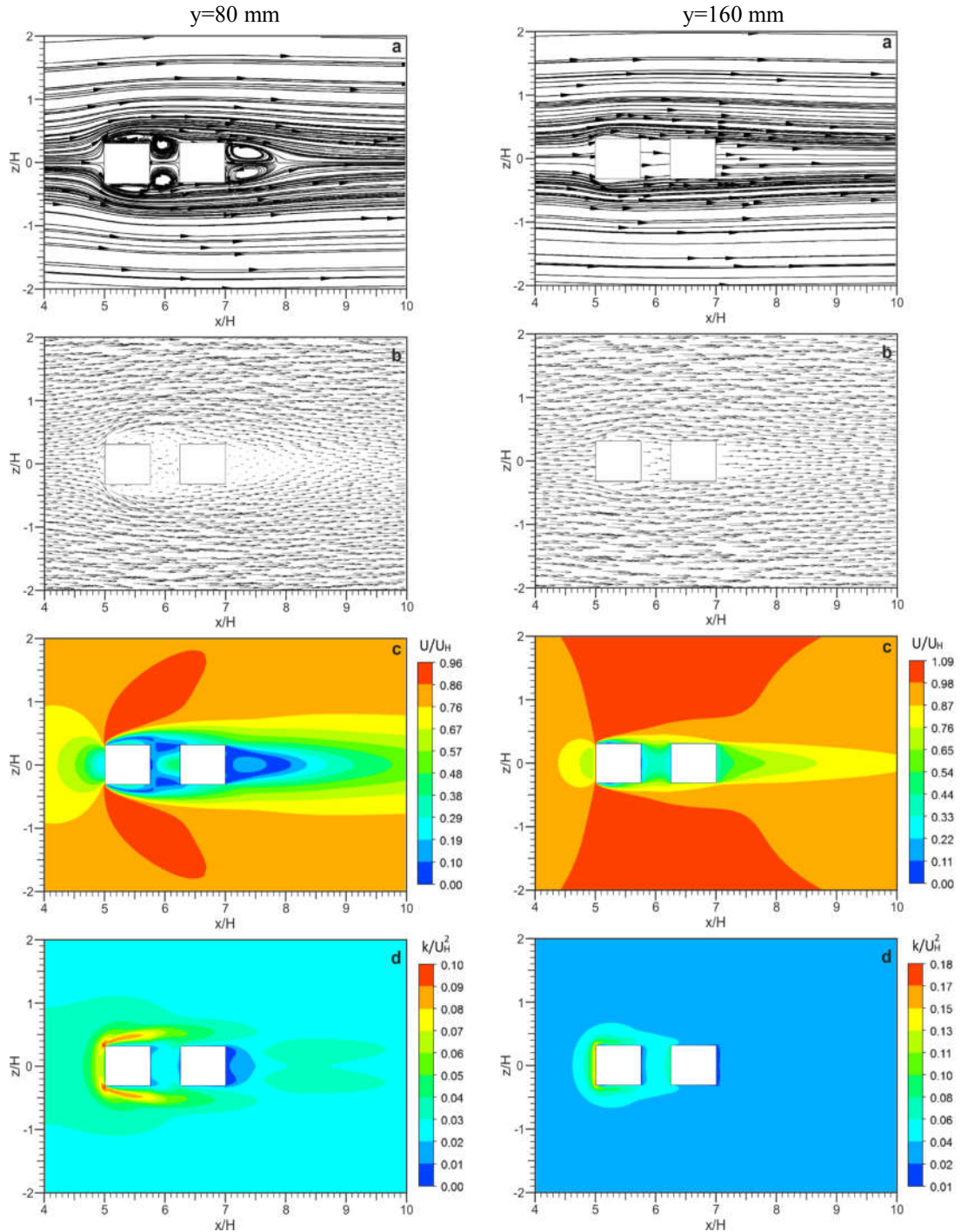
Şekil 2’de mevcut çalışma sonuçları ile daha önce yapılmış sayısal [9] ve deneysel [10] çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması gösterilmektedir. Bina yüzeylerindeki basınç katsayılarının dağılımlarının birbirleri ile çok yakın olduğu görülmektedir.



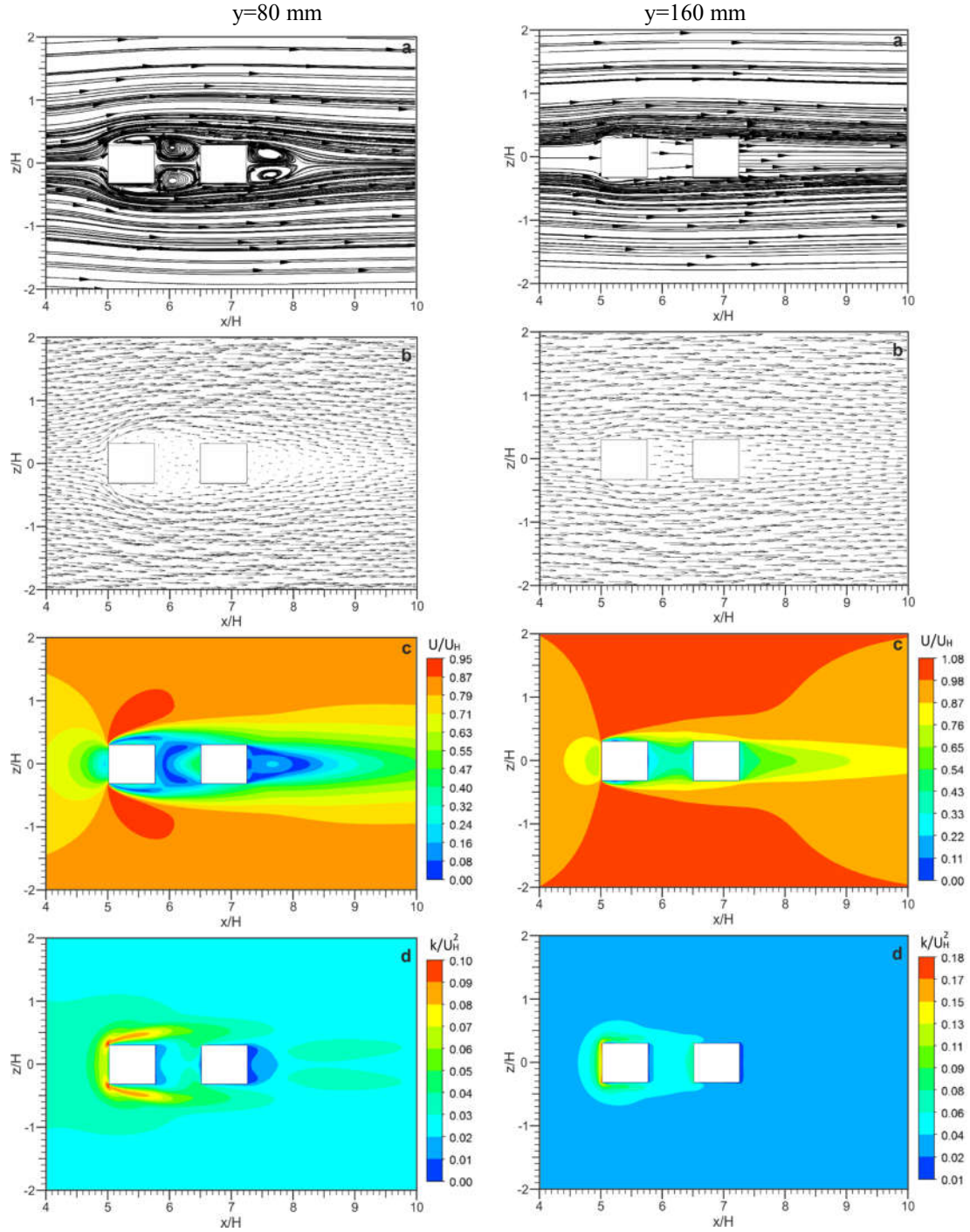
Şekil 2. Bina üzerindeki basınç katsayısı değerlerinin önceki çalışmalarla karşılaştırılması

Analizler sonucunda, binanın hem orta yüksekliğinde hem de çatı yüksekliğindeki akış hareketleri elde edilmiştir ve binaların tüm yönlerde yüzeylerindeki basınç dağılımları da hesaplanmıştır.

Şekil 3’de iki bina arasındaki mesafenin  $S_2=0,5 H$  olması durumunda  $y=80$  mm ve  $y=160$  mm yüksekliğinde akım çizgisi, hız vektörü ve türbülans kinetik enerji değişimleri sunulmaktadır. İlk binada yukarı yönlü akış, yan yüzey duvarında girdap oluşturmuş ve bu girdap bina arkasında saat yönünde dönen girdap ile birleşince daha büyük çaplı girdap oluşmuştur. Aşağı yönlü akış, bina yan duvarında küçük ama ters yönlü, bina arka tarafında saat yönünün tersinde dönen daha büyük ve yan yüzeydeki girdap ile birleşen girdabı oluşturmaktadır.



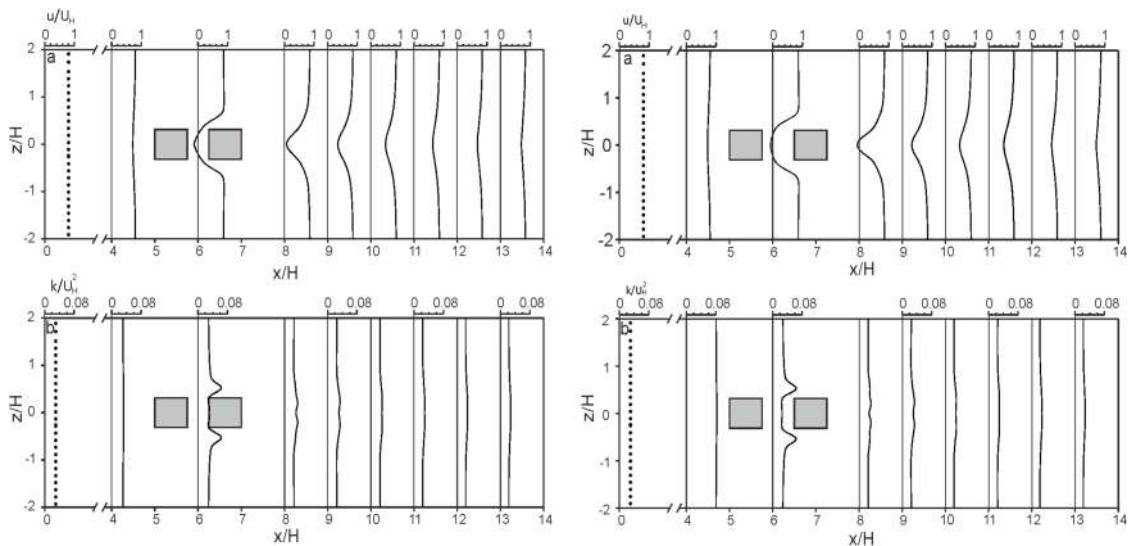
Şekil 3.  $S_2=0,5H$  mesafe için binalardaki akış yapıları a)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm akım çizgisi b)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm hız vektörü c)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm hız d)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm türbülans kinetik enerji



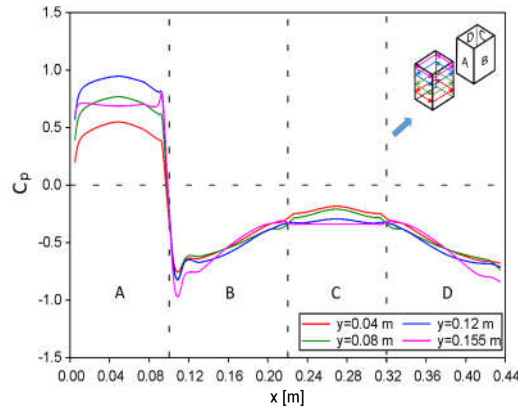
Şekil 4.  $S_2=0,75 H$  mesafe için binalardaki akış yapıları a)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm akım çizgisi b)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm hız vektörü c)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm hız d)  $y=80$  mm,  $y=160$  mm türbülans kinetik enerji

Görünen girdaplar birbirine simetriktir. Arkadaki binanın sadece arka bölgesinde birbirine göre ters yönde dönen simetrik iki girdap oluşmaktadır. Ön binanın yan yüzeyleri yakınında ters yönlü vektörler oluşmakta, binalar arası bölgede ve arkadaki binanın ise sadece iz bölgesinde hız azalmaktadır. Maksimum hız ise ön binanın yan yüzeyleri üzerinde oluşmaktadır. Türbülans kinetik enerji ön binanın ön köşelerinde ve türbülanslı akışların olduğu yan yüzeyler üzerinde en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Arkadaki binanın ise yan yüzeyleri üzerinde ve iz bölgesinde türbülans kinetik enerji yüksek değerlerdedir. Model yüksekliği  $y=0,16$  m seviyesinde, akım çizgilerinde ve hız vektörlerinden görüldüğü gibi her iki bina etrafında da hiçbir girdap oluşumu gözlenmemiştir. Hız dağılımından, ön bina yan yüzeyler üzerinde maksimum hızların olduğu ve büyük bir alanda etkisinin devam ettiği, ara bölgede her iki yükseklik için de hızlarda azalma görülmektedir. İkinci bina ilk binanın iz bölgesi sınırlarında ve bina etrafındaki hız değerleri azalmaktadır. Türbülans kinetik enerjinin en büyük değeri birinci binanın ön yüzeyinde ve çatı seviyesinde gerçekleşmiştir. İkinci binanın yan ve arka yüzeylerinde türbülans kinetik enerji değerlerinin minimum değerde olduğu görülmektedir.

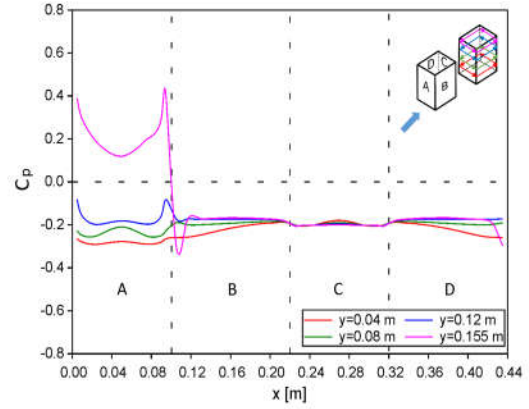
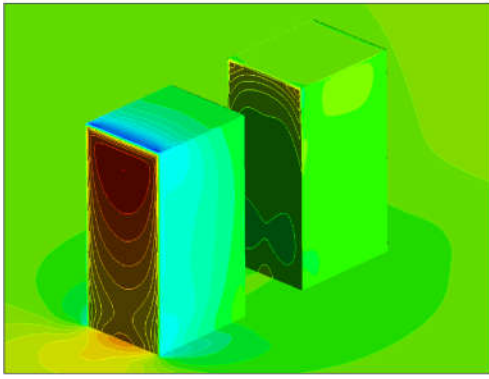
$S_2=0,75$  H olması durumunda ise (Şekil 4) binalar arasındaki mesafenin artırılmasıyla, ön bina arkasında daha büyük saat yönünde dönen girdaplar oluşmuştur. Arka bina arkasındaki girdap şekli ve boyutlarının  $S_2=0,5$  H modeli ile hemen hemen aynı ve simetrik olduğu görülmektedir. Tüm modellerde iki bina arasındaki bölgede akış hız vektörlerinin küçüldüğü gözlenmektedir. Sadece ön binanın yan yüzeyleri yakınında ters yönlü vektörler oluşmaktadır. Ön binanın yan yüzeylerinde, binalar arası bölgede ve arkadaki binanın sadece iz bölgesinde hızların azaldığı, maksimum hızların ön binanın yan yüzeyleri üzerinde olduğu görülmektedir. Türbülans kinetik enerji değişimleri incelendiğinde, yan yüzeyler üzerinde en yüksek değerlere ulaştığı ve binalar arasındaki mesafenin artırılmasının türbülans kinetik enerji dağılımlarında önemli bir etkisi olmadığı görülmektedir. Model yüksekliği seviyesinde ise ilk binanın ön duvarına çarpan hava akışı binalar arkasında girdap oluşturmamıştır. İki bina arası bölgede ve arka binanın iz bölgesinde vektör boylarının küçüldüğü gözlemlenmekte, yan yüzeyler üzerinde maksimum hızın olduğu ve büyük bir alanda etkisinin devam ettiği, ara bölgedeki hız değişiminin model yarı yüksekliğine kıyasla daha az gerçekleştiği görülmektedir.



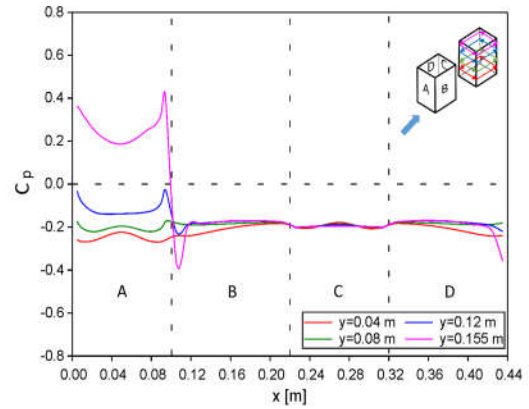
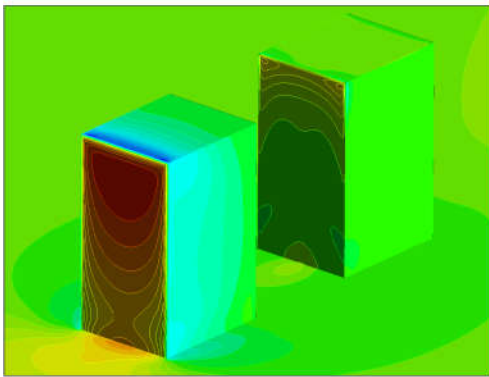
Şekil 5.  $S_2=0,5$  H- $S_2=0,75$  H için  $y= 80$  mm yüksekliğinde yatay doğrultuda a) hız profili b) türbülans kinetik enerji profili



a)



b)



c)

Şekil 6. Bina yüzeylerinde ve farklı yüksekliklerde basınç katsayıları dağılımları, a)  $S_2=0,5 H$  ön bina b)  $S_2=0,5 H$  arka bina c)  $S_2=0,75 H$  arka bina

Türbülans kinetik enerji, model yüksekliği seviyesinde daha yüksek değerlerde görülmektedir. Şekil 5'de  $S_2=0,5 H$  ve  $0,75 H$  ara mesafeli iki bina modeli arkasında, modellerinin yarı yüksekliği seviyesinde  $y=0,08 m$ , yatay doğrultuda farklı noktalarda hesaplanan hız ve türbülans kinetik enerji profilleri gösterilmektedir. Ön bina arkasındaki iz bölgesinde hız değerleri azalmış ve ters akış bölgesi oluşmaktadır. İkinci binanın iz bölgesindeki hız değerleri azalmakta ve ters akış bölgesinin oluşumunu hızlandırmaktadır. (Şekil 5a). Akış yönünde konumlarda hızdaki azalma etkisi yok olmaktadır. Arka binanın üst ve altında türbülans kinetik enerji değerlerinde artış olurken, binadan uzaklaştıkça şiddeti azalmaktadır (Şekil 5b).  $S_2=0,75 H$  ara mesafeli iki bina modeli arkasında,  $S_2=0,5 H$  modeli ile karşılaştırıldığında hız ve kinetik enerji profillerinin aynı olduğu, maksimum hızın ve türbülans kinetik enerjisinin arkadaki binanın hemen ön tarafında olduğu görülmektedir.  $x/H=9$  değerinden sonra hız profillerindeki dalgalanmaların ve tepe noktalarının azaldığı görülmektedir. Her iki bina modeli için  $S_2=0,5 H-0,75 H$  yüzeylerdeki basınç katsayıları değişimleri Şekil 6'da gösterilmektedir. A yüzeyi rüzgara doğrudan maruz kalmakta ve pozitif basınç katsayıları oluşmaktadır. Zeminden çatıya doğru yükseklik arttıkça basınç katsayıları artmakta ve çatı bölgesinde değerler azalmaktadır. Binaların iki yan (B ve D) ve arka (C) duvarlarında ise negatif basınç katsayısının mevcut olduğu gözlenmektedir. B yüzeyinde x yönünde ilerledikçe  $C_p$  değeri artmakta, C yüzeyinde hemen hemen sabit kalmakta ve D yüzeyinde ise tekrar azalmaktadır.

## 5. SONUÇLAR

Bina duvarlarındaki basınç dağılımları, rüzgar yüklerinin bina üzerinde oluşturduğu akış yapılarını, doğal havalandırma ile oluşturulan iç hava kalitesi ve iç konfor şartlarını önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışmada  $S_2=0,5 H$  ve  $S_2=0,75 H$  mesafelerinde arka arkaya yerleştirilmiş iki bina etrafında oluşan akış yapıları ile türbülans kinetik enerji değişimleri ve basınç katsayıları hesaplanmıştır. Pozitif basınç katsayılarının binanın ön duvarında olduğu ve

bina yüksekliği ile arttığı, arka binanın tüm yüzeylerinde basınç dağılımının yükseklikle az miktarda değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, negatif basınç oluşumları hem ön hem de arka bina için yan yüzeylerde ve bina arkasında gerçekleşerek, çatı bölgesinde en yüksek düzeye ulaşmıştır. Analiz sonuçlarından, iki bina arasındaki mesafenin arka bina üzerinde oluşan akış yapılarını ve girdap oluşumunu etkilediği gözlenmiştir. Bu nedenle mimari tasarımlarda binaların birbirine göre konumları belirlenirken, rüzgar hızı ve akış yapılarının da dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

## 6. TEŞEKKÜR

M-611 numaralı proje ile destekleyen Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

## 7. KAYNAKLAR

1. Ntinias, G.K., Shen, X., Wang, Y., Zhang, G., 2019. Evaluation of CFD Turbulence Models for Simulating External Airflow Around Varied Building Roof with Wind Tunnel Experiment, Building Simulation, 12, 115-123.
2. Özmen, Y., Baydar E., Van Beeck J.P.A.J., 2016. Wind Flow Over the Low-rise Building Models with Gabled Roofs Having Different Pitch Angles. Building and Environment, 95, 63-74.
3. Rajasekarababu, K.B., Vinayagamurthy, G., Selvi Rajan, S., 2019., Experimental and Computational Investigation of Outdoor Wind Flow Around a Setback Building, Building Simulation, 12, 891-904.
4. Wang, B., Cot, L.D., Adolphe, L., Geoffroy, S., 2017. Estimation of Wind Energy of a Building with Canopy Roof, Sustainable Cities and Society, 35, 402-416.
5. Lee, D.S., 2017. Impacts of Surrounding Building Layers in CFD Wind Simulations, Energy Procedia, 122, 50-55.
6. Chen, B., Shang, L., Qin, M., Chen, X., Yang, Q., 2018. Wind Interference Effects of High-rise Building on Low-rise Building with Flat

- Roof, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 183, 88-113.
7. Fertelli, A., Balta, M., 2017. Tek ve İki Bina Etrafındaki Rüzgar Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi, Çkurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32-3, 111-119.
  8. ANSYS 14, 2011. User Guide.
  9. Kaydok, T., 2014. Farklı Kesitlere Sahip Yüksek Binalar Üzerinde Türbülanslı Akışların Sayısal İncelenmesi. KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 94, Trabzon.
  10. Hunte, S., 2010. Testing the Application of CFD for Building Design. Delft University of Technology (Master Thesis), Netherland.





## Failure Analysis of Low-density Polymer Foam Core Sandwich Structures under Three-point Bending Loading

Çağrı UZAY\*<sup>1</sup>, Necdet GEREN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Adana

Geliş tarihi: 06.12.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Abstract

In this study, low-density polymer foam core sandwich beams, non-existent in the literature, having woven carbon/epoxy face sheets in different core thicknesses and specimen lengths were fabricated and then subjected to three-point bending tests. The bending behavior of the sandwich beams were scrutinized experimentally. The effects of both core thickness and specimen length were revealed. As the ratio of face sheet to core decreases, transferring of shear forces between the face sheets decreases and the face sheets also become weaker. Hence, the failure mode changes from core shearing to indentation and the sandwiches have become tendency to fail by indentation. The theoretical models available in the literature was also utilized to predict the failure mode and collapse forces. The results indicated that both analytical calculations and experimental findings are compatible with each other.

**Keywords:** Core shear, Failure mode, Indentation, Sandwich structures, Three-point bending

### Üç Nokta Eğilme Yükleme Altındaki Düşük Yoğunluklu Polimer Köpük Sandviç Yapıların Hasar Analizi

### Öz

Bu çalışmada, örgü dokuma karbon/epoksi yüzeylere sahip, literatürde yer almayan, düşük yoğunluklu polimer köpük çekirdek sandviç kirişler, farklı uzunluk ve çekirdek kalınlıklarında üretilmiş üç nokta eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Sandviç kirişlerin deneysel olarak eğilme davranışları incelenmiştir. Hem numune uzunluğunun hem de çekirdek kalınlığının etkisi ortaya çıkarılmıştır. Yüzey tabaka kalınlığının çekirdek kalınlığına oranı azaldıkça, yüzeyler arasındaki kayma kuvvetlerinin transferi azalmaktadır ve yüzeyler de zayıflamaktadır. Bu yüzden, hasar modu çekirdek kayması hasarından batma hasarına doğru değişmektedir ve sandviçler batma şeklindeki hasara uğramaya meyilli olmaktadır. Hasar modunu ve çökme kuvvetlerini tahmin etmek için literatürde mevcut bulunan teorik modellerden de faydalanılmıştır. Sonuçlar, hem analitik hesapların hem de deneysel bulguların birbirleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Batma, Çekirdek kayması, Hasar modu, Sandviç yapılar, Üç nokta eğilme

---

\*Corresponding Author (Sorumlu yazar): Çağrı UZAY, [cuzay@cu.edu.tr](mailto:cuzay@cu.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

Conventional industrial materials such as metals and their alloys have been replaced with stiff, strong and lightweight hybrid materials with growing and developing technology. A sandwich structure, belongs to hybrid material family, consists of two thinner face sheets bonded to a relatively thick core material with the aid of a matrix surrounding. The face sheets can be made of metallic sheets, fiber reinforced composites whereas the core can be made of metal or polymer foams, honeycomb, balsa wood, corrugated structures [1-2]. Fiber-metal laminates (FMLs) have also been used for face sheets [3]. Due to their high stiffness to weight ratio, good impact and fatigue resistance, sandwich composites have arisen as structural members in the fields of automotive, transportation, space and aviation, marine, sporting goods, and etc. [4].

The variations in constituent materials allow many researchers to investigate the effects of them on physical and mechanical properties of sandwich structures under different loading conditions. Therefore, the previous studies have mostly concentrated on the influences of different types of face sheets, thickness of both the face sheets and the core, type and density of the core, type of matrix material. For example high impact toughness and better insulation to heat and acoustic can be obtained by using aluminum (Al) foams [3, 5-7]. On the other hand, polymer foam cores can be used for weight critical application where high flexural rigidity is essential [2].

The sandwich constituent materials' properties, geometric dimensions and types of loading are affecting factors for the initiation and growing of failure modes. The failure of the sandwich structures may occur mainly due to the face yield, core shear, indentation, face sheet debonding, and face sheet wrinkling [8,9]. For instance, as the thickness ratio of face sheet to core ( $t/c$ ) decreases, the failure mode changes from core shearing to indentation due to the weakness of face sheet and the sandwiches have tendency to fail based on the indentation. On the other hand, the thicker cores provide more rigidity to a sandwich structure, and

it resist higher bending loads due to the increased moment of inertia. Therefore, there is a transition between the failure modes and the type of failure mode should be investigated [10].

Styles et al. [11] investigated the effect of core thickness (5 mm, 10 mm, and 20 mm) on deformation behavior of an Al foam core ( $230 \text{ kg/m}^3$ ) sandwich structure having thermoplastic composite face sheets under four-point bending. It was found out that the thinner specimens exhibited skin wrinkling and fracture, and some core cracking, and core crushing was seen in thinner foam cores while the thicker specimens failed due to core indentation. But it was concluded that the incidence of core indentation was eliminated by increasing the face sheet thickness. In addition, it was reported that increasing core thickness drastically improved the structural rigidity. Kabir et al. [12] investigated effect of three-point bending behavior of very thin (0,32 mm) Al face sheets that were constructed with 6 mm and 12 mm Al foam cores, respectively. Although very thin face sheets primarily yielded indentation failure, core shear failure was occurred in the case of using high strength face sheets. Jiang et al. [13] established an analytical model to predict the failure modes in terms of face yield, core shear and indentation. In order to verify the model, they used several sandwich designs with 10-20-30-40-50 mm thick Al foam core having 0.17 relative density and 0.5-3-6 mm thick Al face sheets, and subjected the sandwich specimens to the three-point bending tests. Although the proposed failure models were in a good agreement with experimental results for the sandwich structures having thick face sheets, the determination of the load carrying capacity and the analysis of the indentation failure mode required further improvements. Similar conclusions for polymer foam core/fiber reinforced face sheet sandwiches are existed in the literature. Lim et al. [14] fabricated sandwich panels with woven plain glass fiber epoxy prepregs and 10 mm thick PVC foam core. While face sheet thickness varied from 0.58 mm to 1.02 mm, core density changed from  $54 \text{ kg/m}^3$  to  $117 \text{ kg/m}^3$ . The increase in thickness of the face sheets caused a change in failure mode. Thinner facings tended to fail by face fracture, but as the thickness increased, it tended to core compression or shear yielding. On the other hand, due to the change of core density, an obvious change in failure modes was not observed.

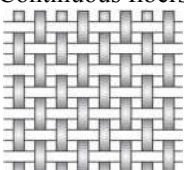
Sandwich design principles are based on the failure modes, and the collapse force that predicts the maximum load carried by the structure before failure. Therefore, examination of the failure behavior under a particular loading condition is essential to diagnose the type of failure. It also helps to designer to select more suitable constituent materials and geometry for the further sandwich constructions. In this study, three-point bending behavior of low-density polymer foam core carbon/epoxy sandwich beams were experimentally investigated considering the effects of core thickness and support span length. The findings were also compared with the analytical approaches available in the literature, and the primary failure modes of the sandwich beams were addressed.

## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1. Materials

Sandwich specimens were constructed with woven carbon fiber fabrics and PVC foam core materials. Three different core thickness values (10 mm, 20 mm and 30 mm) were considered in the study. The fiber face sheets were bonded to the foam core by using polymer matrix. Table 1-3 provide physical and mechanical properties of sandwich constituents.

**Table 1.** The properties of carbon fiber fabric [15]

Property	Value
Fabric sketch and description	Plain weave, Woven, Continuous fibers 
Areal density	200 g/m <sup>2</sup>
Thickness	0.20 mm
Density	1790 kg/m <sup>3</sup>
Tensile strength	3800 MPa
Tensile modulus	240 GPa
Tensile strain	1.6 %

**Table 2.** Physical and mechanical properties of PVC foam core material [16]

Physical and Mechanical Properties	Value
Commercial name	Airex C70.48
Density	48 kg/m <sup>3</sup>
Thickness (mm)	10, 20, 30
Compressive strength	0.60 MPa
Compressive modulus	48 MPa
Tensile strength	0.95 MPa
Tensile modulus	35 MPa
Shear strength	0.55 MPa
Shear modulus	16 MPa

**Table 3.** Physical and mechanical properties of the matrix system [17]

Physical and Mechanical Properties	Epoxy resin	Hardener
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.13-1.17	0.96-1.00
Viscosity (mPa.s)	700-900	10-50
<i>The Matrix Properties</i>		
Density	1,18-1,20 kg/m <sup>3</sup>	
Flexural strength	110-140 MPa	
Modulus of elasticity	3.2-3.5 GPa	
Tensile strength	70-80 MPa	
Compressive strength	80-100 MPa	

### 2.2. Manufacturing of Sandwich Specimens

Sandwich composites were manufactured by using vacuum bag method. At the start of process, the amount of matrix material was determined based on the total amount of fiber fabrics. Epoxy resin was used together with suitable hardener to prepare the matrix. Ratio of the hardener in the mixture was 25 wt. %. The mixture was stirred carefully to minimize voids which weaken the final product. Then, manufacturing of the sandwich panels were performed over an open mold by stacking the face sheets and the core with hand lay-up. For each face sheets, four plies of carbon fiber fabrics were stacked symmetrically with respect to sandwich neutral axis. During the hand lay-up, the structure was performed with care to prevent the formation of air bubbles. Because the shear forces transmitted between the face sheet and the core mostly depend on chemical bonding

of the layers. Figure 1 illustrates the schematic view of the sandwich manufacturing. As seen, the sandwich panel was enclosed by a sealant tape within a vacuum bag. The perforated release film and breather were used over the sandwich panel. The former allows passing of air bubbles from the structure, draining of excessive resin and ease of handling whereas the latter collects the excessive resin.

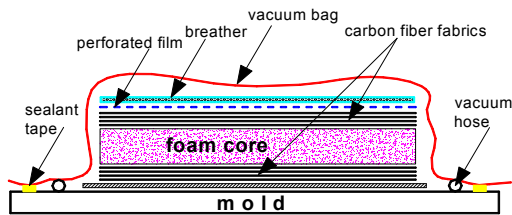


Figure 1. Schematic view of sandwich manufacturing

Lastly, sandwich panels were cured for 24 hours under vacuum atmosphere at room temperature.

The fabrications were made considering three different core thickness values and two different lengths. Designation of the sandwich samples were based on the considerations, and given in Table 4. For instance, a sandwich configuration of S1.T10.L20 has 10 mm thick foam core (T10), a length of 200 mm (L20) and named as sample one (S1). All sandwich configurations have identical face sheets and have 0.82 mm skin thickness.

After the sandwiches produced, their fiber volume fraction ( $V_f$ ) values were determined with burn off tests. As provided by McDonough et al. [18], the specimens taken from sandwich panels were burned in a muffle furnace at 600 °C for an hour. Then, according to weight differences of fiber and matrix of face sheets before and after the burn off tests, %  $V_f$  values were calculated and given in Table 4. The findings are consistent since the results slightly change from 49.2% to 51.8%.

### 2.3. Experimental Study

Sandwich specimens were tested under three-point bending loading. As given in Table 4, long and short length (L) specimens are available and the

tests were performed with two different support span lengths. Figure 2 demonstrates the schematic views of the three-point bending loading according to support span lengths (S). In this figure, t, c, and d are the thickness of face sheets, core and sandwich, respectively [19,20].

Table 4. Sandwich configurations and  $V_f$  values

Sandwich Configurations	Core Thickness (mm)	Length (mm)	$V_f$ (%)
S1.T10.L20	10	200	51,8
S2.T10.S25	10	250	51,8
S3.T20.S20	20	200	49,2
S4.T20.S25	20	250	49,2
S5.T30.S20	30	200	50,7
S6.T30.S25	30	250	50,7

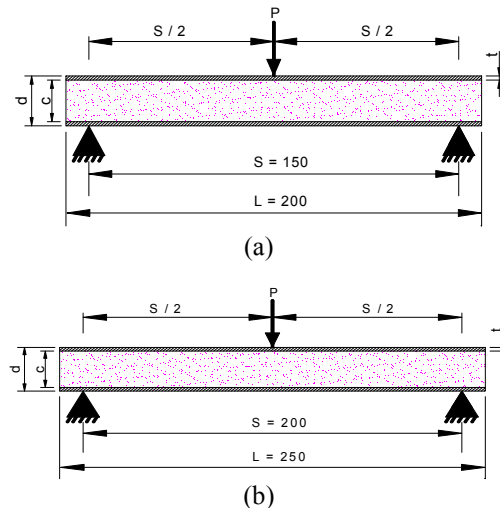


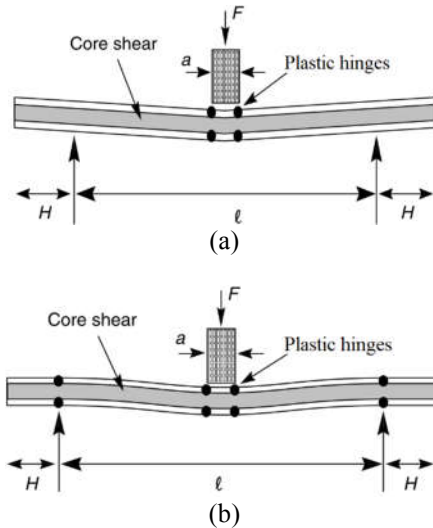
Figure 2. Schematic views of bending tests under a span length of; a) 150 mm, b) 200 mm (dimensions are in mm)

ASTM C393 [19] and ASTM D7249 [20] standards were utilized for bending tests and Instron universal testing machine was used. The testing speed was set to 2 mm/min.

### 2.4. Theoretical Study

Particularly two different failure mechanisms are introduced for polymer foam core carbon fiber sandwich structures since they are related to scope of the present study. These are core shear and indentation failure modes. Ashby et al. [8]

provided the basic principles of the failure modes based on the schematic representations as shown in Figure 3 and 4. In addition, core shear failure mode also has two different types called as Case I and Case II.



**Figure 3.** Failure mechanisms of core shear modes; a) Case I, b) Case II [8]

In case I, the formation of plastic hinges occurs at mid-span under the loading roller whereas in case II, the plastic hinges occur both at mid-span under loading roller and outer support rollers.

The collapse force,  $F$ , was defined by Ashby et al. [8] as the failure force by core shearing and it is calculated according to Equations 1 and 2 for the first and second cases, respectively.

$$F_I = \frac{2bt^2}{l} \sigma_y^f + 2bc\tau_y^c \left(1 + \frac{2H}{l}\right) \quad (1)$$

$$F_{II} = \frac{4bt^2}{l} \sigma_y^f + 2bc\tau_y^c \quad (2)$$

Where  $F_I$  and  $F_{II}$  are the collapse forces for case I and case II, respectively. And the notation  $b$ ,  $t$ ,  $c$ , and  $l$  denote the sandwich width, facing thickness, core thickness and span length, respectively.  $\sigma_y^f$  and  $\tau_y^c$  denote tensile yield and core shear yield strengths, respectively.  $\tau_y^c$  was obtained from manufacturer data sheet [16] whereas  $\sigma_y^f$  is

calculated based on the following analytical Equations 3-6 provided by Kaw [21];

$$\sigma_2^f = E_2 \cdot \epsilon_2^{ult} \quad (3)$$

Where,  $\sigma_2^f$  is transverse tensile strength of the facing material,  $E_2$  and  $\epsilon_2^{ult}$  are transverse modulus and transverse ultimate strain of the facing, respectively. Both of them are obtained in Equations 4 and 5. Here, facing yield strength ( $\sigma_y^f$ ) is taken equal to transverse tensile strength ( $\sigma_2^f$ ) since its value is smaller than the longitudinal tensile strength as expected and taken as the critical one.

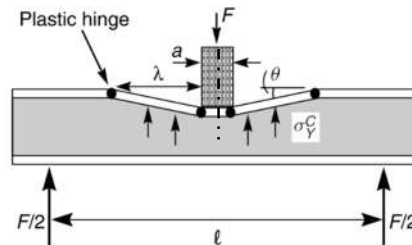
$$E_2 = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + E_f (1 - V_f)} \quad (4)$$

$$\epsilon_2^{ult} = \left[ \frac{d}{s} \cdot \frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{d}{s}\right) \cdot \epsilon_m^{ult} \right] \quad (5)$$

Where,  $E_m$  and  $E_f$  are modulus of matrix and fiber elements, respectively,  $\epsilon_m^{ult}$  is ultimate strain of the matrix.  $d/s$  which is the fiber diameter to fiber spacing dependent upon  $V_f$  and it was defined by Kaw [21] for circular cross-sectional fiber with square array orientation as follow (Equation 6);

$$\frac{d}{s} = \left(\frac{4V_f}{\pi}\right)^{1/2} \quad (6)$$

Figure 4 presents the schematic view of the indentation failure mode. In this kind of failure mode, the formation of plastic hinges occurs on top facing of the sandwich structures at both under the loading roller and adjacent to it. In this figure,  $a$  denotes loading roller diameter,  $\lambda$  is the wavelength. The collapse load,  $F$ , for indentation failure was defined by Equations 7 and 8 [8].



**Figure 4.** Indentation failure mode [8]

$$F=(2\lambda+a)b\sigma_y^c+\frac{4M_P}{\lambda} \quad (7)$$

$$M_P = (b.t_f)/4 \quad (8)$$

However, the analytical model for the indentation provided by Ashby et al. [8] did not consider the span length during finding the collapse failure force of the sandwich panels. Therefore, a different model provided by Steeves and Fleck [22] was also used (Equation 9) for evaluation of the indentation failure load,  $P_i$ . The model given by Steeves and Fleck [22] also considers the span length.

$$P_i=bt_f\left(\frac{\pi^2\sigma_c^2E_frd}{3L}\right)^{1/3} \quad (9)$$

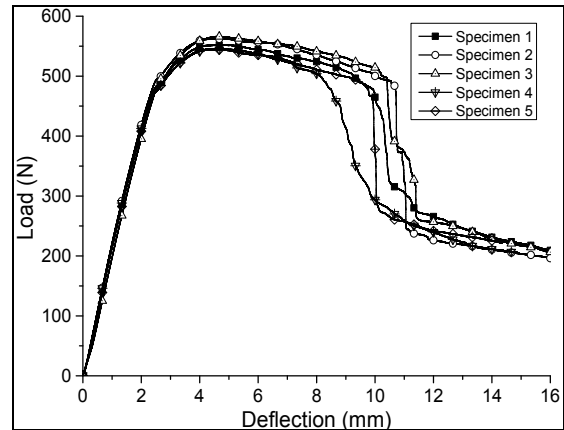
### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Three-point Bending Test Results

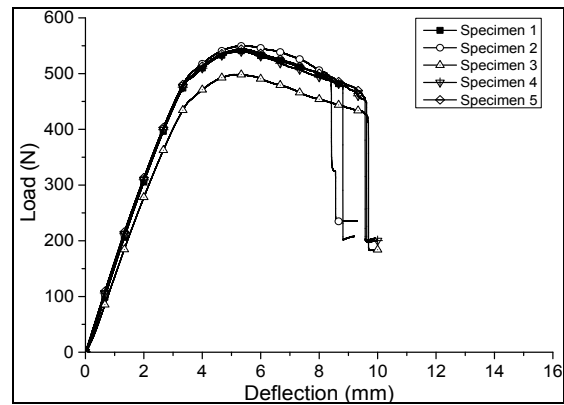
The sandwich samples given in Table 4 were subjected to quasi-static three-point bending loading. Each sample was tested with five replications to verify consistence of the results. The raw data in terms of load and deflection were obtained from the testing machine software and then plotted for each configuration. In Figures 5-7, the load-deflection curves of the sandwich specimens were presented based on sandwich length and the core thickness, respectively. The maximum bending load values of sandwich beams carried before failure are given in Table 5. Standard deviations are also given in the last column of the table.

As seen from the figures, the sandwich specimens showed a linear increase in the slope of bending force/deflection, and then a nonlinear and gradual increase of the slope was continued up to a maximum point of the force. The sandwiches apart from S1.T10.L20 and S2.T10.L25 configurations were failed with a sudden drop after the bending force value was reached to the maximum. However, for the sandwiches having 10 mm thick core, a downward slope, which starts at the maximum point up to sudden drop of the force, was observed.

In Figure 5(a), the bending load was carried with a small decreasing slope between the approximate deflection values of 4 mm and 10 mm. At this interval, fibers and matrix failures were initiated. But, the load was carried by the upper face sheet, and there was core crushing between the facings. Lastly, a sudden drop in force was observed due to upper face sheet compressive failure at a deflection of ~10 mm. In the case of long-length specimens, presented in Figure 5(b), similar behavior was observed but the decreasing slope between the maximum point and initiation of sudden drop of the force is higher compared to that of short length specimens. This is due to the long support span length of the specimens.



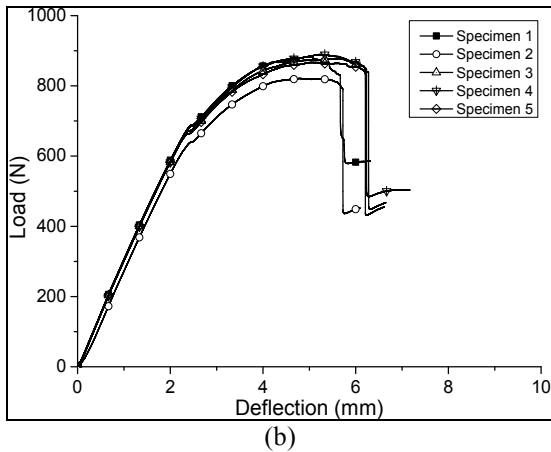
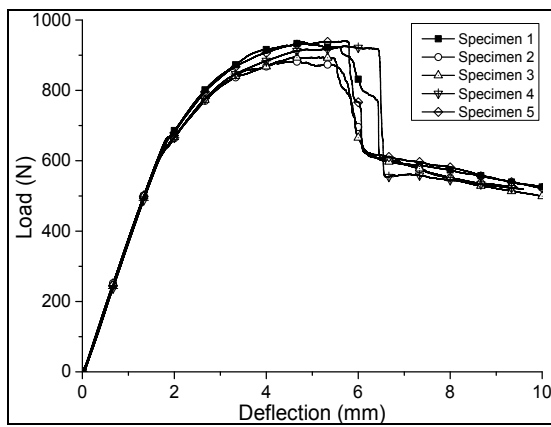
(a)



(b)

**Figure 5.** Load-deflection curves of 10 mm thick core sandwich specimens having a length of; a) 200 mm, b) 250 mm

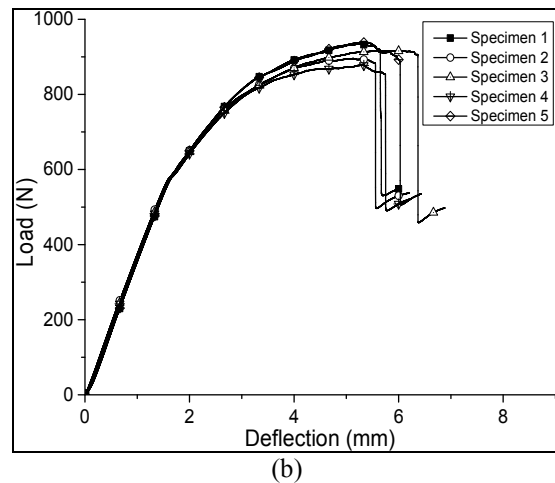
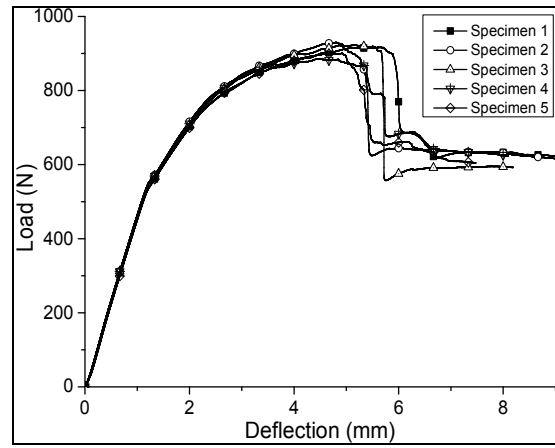
Although the deflection between the end of linear increase of the slope and the maximum point of the bending force was small, in the case of 20 mm thick core sandwich panels, the amount of specimens' deflection was found higher as shown in Figure 6. And drop of the bending force occurred suddenly after the force was reached to the maximum. Initiation of the sudden failure was approximately 6.29 mm (Figure 6a) and 6.22 mm (Figure 6b) for short and long specimens, respectively.



**Figure 6.** Load-deflection curves of 20 mm thick core sandwich specimens having a length of; a) 200 mm, b) 250 mm

As seen in Figure 7 the sandwiches' deflections between the end of the linear point and the maximum point are larger than both 10 mm and 20

mm thick core sandwich specimens. And the sudden drop in bending force occurred approximately at 5.59 mm deflection for short specimens (Figure 7a) whereas it was 5.75 mm for long specimens (Figure 7b).



**Figure 7.** Load-deflection curves of 30 mm thick core sandwich specimens having a length of; a) 200 mm, b) 250 mm

In all figures above, the initial stiffness of the short specimens are obtained higher than that of longer specimens. In addition to that as presented in Table 5, load carrying capacities of the long-length specimens decreased due to the increased support span length under three-point bending tests as expected [23].

**Table 5.** The maximum bending loads of sandwich configurations before loading

Sandwich Configurations	Max. Bending Load (N)	Std. Dev.
S1.T10.L20	554,36	8,76
S2.T10.S25	535,07	18,38
S3.T20.S20	916,15	23,56
S4.T20.S25	867,73	24,31
S5.T30.S20	911,99	15,59
S6.T30.S25	912,95	23,04

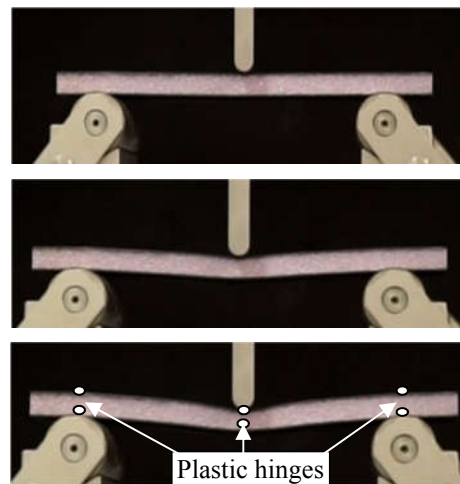
**3.2. Examination of Failure Behaviors**

Although all sandwich configurations initially show a linear increase in bending force up to a certain point, the non-linear portion of the force increment strongly associated with the change of failure behavior due to the increase of core thickness. Because Bezazi et al. [24] stated that the nonlinear behavior depends upon the foam core properties under the effect of core shearing forces and/or indentation.

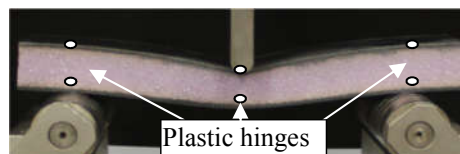
In order to decide the failure modes of the sandwiches, images of the bending behavior of the specimens were captured periodically by a camera during three-point bending tests. For instance, as presented in Figure 8, the time-dependent bending behavior of S1.T10.L20 was monitored progressively. This provided very similar behavior to core shear mechanism of case II as given previously in Figure 3. A similar behavior was also observed for S2.T10.S25 sandwich beams. As discussed in the literature [8], the failure was developed due to core shear since the most portion of the collapse force was carried by the core material as the sandwich specimens were exposed to transverse shear forces. Figure 9 shows the failure of S3.T20.L20 sandwich configuration that looks like as core shear followed by the indentation whereas Figure 10 shows the indentation failure of S5.T30.L20 sandwich configuration.

The collapse forces of the sandwich configurations were predicted with the aid of theoretical equations mentioned in the Section 2.4, in Materials and Method. The calculated results (Theo. Load) are given in Tables 6-8 comparatively together with

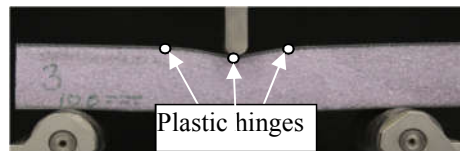
experimentally (Exp. Load) obtained results. In the case of 10 mm thick core sandwiches the differences are 1.79% and 3.51% for the short and long length specimens, respectively. For 20 thick core sandwiches, indentation failure models were applied and according to Ashby [8] model, 4.31% and 10.13% difference are found for short and long length specimens, respectively. However, according to Steeve and Fleck [22] model, when the effect of span length is considered, the differences are obtained 9.96% and 13.63% for short and long specimens, respectively. In the case of 30 mm thick core sandwiches, the differences are obtained as 4.47% and 4.36% for Ashby [8] model as this is 3.63% and 5.94% for Steeve and Fleck [22] model for short and long specimens, respectively.



**Figure 8.** Progressive representation of failure behavior of S1.T10.S20



**Figure 9.** Failure behavior of S3.T20.L20



**Figure 10.** Failure behavior of S5.T30.L20



**Table 6.** The collapse forces of 10 mm thick core sandwiches

Sandwiches	Exp. Load (N)	Theo. Load (N)
S1.T10.L20	554.36	564.31
S2.T10.S25	535.07	553.85

**Table 7.** The collapse forces of 20 mm thick core sandwiches

Sandwiches	Exp. Load (N)	Theo. Load (N)	
		Ashby [8]	Steeve and Fleck [22]
S3.T20.L20	916.15	955.67	824.83
S4.T20.S25	867.73	955.67	749.41

**Table 8.** The collapse forces of 30 mm thick core sandwiches

Sandwiches	Exp. Load (N)	Theo. Load (N)	
		Ashby [8]	Steeve and Fleck [22]
S5.T30.L20	911.99	952.76	945.13
S6.T30.S25	912.95	952.76	858.71

#### 4. CONCLUSION

In this study the bending behavior of very low-density polymer foam core carbon/epoxy sandwich beams were investigated and their failure analysis were made. The experimental results are in a good agreement with theoretically obtained results. The following conclusions can be drawn from the study;

- While 10 mm thick core sandwich beams failed due to core shearing, failure mode of thick core sandwiches changed from core shearing to indentation.
- As the face sheet-core thickness ratio ( $t/c$ ) decreases, the sandwich structures highly resist bending but fail based on the indentation failure mode.
- Especially, 30 mm thick core sandwich specimens approximately carried the same bending load compared to that of 20 mm thick core due to indentation. Because face sheets, load carrying members of a sandwich, become

weaker. In addition, the transferring of shear stress throughout the core decreases.

- As stated by Daniel et al. [9] indentation creates concentrated loads on the structure which is a serious problem for sandwich design. Therefore, there should be a thickness limit of the core in order to avoid indentation.

#### 5. REFERENCES

1. Ashby, M.F., 2011. Materials Selection in Mechanical Design. Elsevier, 4<sup>th</sup> Edition, The Netherlands.
2. Gibson, R.F., 2012. Principles of Composite Material Mechanics. 3<sup>rd</sup> Edition, CRC Press, USA.
3. Liu, C., Zhang, Y.X., Heslehurst, R., 2014. Impact Resistance and Bonding Capability of Sandwich Panels with Fibre-Metal Laminate Skins and Aluminium Foam Core. Journal of Adhesion Science and Technology, 28(24), 2378-2392.
4. Mallick, P.K., 2007. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. CRC Press.
5. Basturk, S.B., Tanoglu, M., 2011. Mechanical and Energy Absorption Behaviors of Metal/Polymer Layered Sandwich Structures. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 30(18), 1539-1547.
6. Xu, J., Liu, J., Gu, W., Wang, Z., Liu, X., Cao, T., 2018. Effect of Cell Size on the Energy Absorption of Closed-Cell Aluminum Foam. Materials Testing, 60, 583-590.
7. Harte, A.M., Fleck, N.A., Ashby, M.F., 2000. Sandwich Panel Design Using Aluminum Alloy Foam. Advanced Engineering Materials, 2(4), 219-222.
8. Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., 2000. Metal Foams: a Design Guide. London: Butterworth, Heinemann, 251.
9. Daniel, I.M., Gdoutos, E.E., Wang, K.A., Abot, J.L., 2002. Failure Modes of Composite Sandwich Beams. International Journal of Damage Mechanics, 11, 309-334.

10. Carlsson, L.A., Kardomateas, G.A., 2011. Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites, Springer, USA.
11. Styles, M., Compston, P., Kalyanasundaram, S., 2007. The Effect of Core Thickness on the Flexural Behaviour of Aluminium Foam Sandwich Structures. *Composite Structures*, 80(4), 532-538.
12. Kabir, K., Vodenitcharova, T., Hoffman, M., 2014. Response of Aluminium Foam-Cored Sandwich Panels to Bending Load. *Composites Part B-Engineering*, 64, 24-32.
13. Jiang, B.H., Li, Z.B., Lu, F.Y., 2015. Failure Mechanism of Sandwich Beams Subjected to Three-Point Bending. *Composite Structures*, 133, 739-745.
14. Lim, T.S., Lee, C.S., Lee, D.G., 2004. Failure Modes of Foam Core Sandwich Beams under Static and Impact Loads. *Journal of Composite Materials*, 38(18), 1639-1662.
15. Technical Data Sheet, Dost Kimya Inc., 2014. Carbon Fabric-200gr/sqm 3K Plain. Rev.2.2, Turkey, 1.
16. Technical Data Sheet, 2011. Universal Structural Foam: Airex C70. 3A Composites.
17. Technical Data Sheet, 2009. Laminating Resin MGSTM L160 and Hardener H160, Hexion, The Netherlands, 10.
18. McDonough, W.G., Dunkers, J.P., Flynn, K.M., Hunston, D.L., 2004. A Test Method to Determine the Fiber and Void Contents of Carbon/Glass Hybrid Composites. *Journal of ASTM International*, 1(3), 1-15.
19. ASTM C393/C393M-11, 2011. Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 8.
20. ASTM D7249/D7249M-12, 2012. Standard Test Method for Facing Properties of Sandwich Constructions by Long Beam Flexure. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, USA, 9.
21. Kaw, A.K., 2006. *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press, 2<sup>nd</sup> Edition, USA, 457.
22. Steeves, C.A., Fleck, N.A., 2004. Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-Point Bending. Part II: Experimental Investigation and Numerical Modelling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46(4), 585-608.
23. Sadeghian, P., Hristozovand, D., Wroblewski, L., 2018. Experimental and Analytical Behavior of Sandwich Composite Beams: Comparison of Natural and Synthetic Materials. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 20(3), 287-307.
24. Bezazi, A., Mahi, A., Berthelot, J.M., Bezzazi, B., 2007. Experimental Analysis of Behavior and Damage of Sandwich Composite Materials in Three-Point Bending. Part 1. Static Tests and Stiffness Degradation at Failure Studies. *Strength of Materials*, 39(2), 170-77.

## **Peyniraltı Suyunun Koagülasyon/Flokülasyon Yöntemiyle Arıtılmasında Doğal Bir Koagülant Olan Montmorillonitin Kullanılması**

**Ayşe ÖZGÜVEN<sup>1</sup>, Tuba BAYRAM<sup>\*1</sup>, Dilara ÖZTÜRK<sup>1</sup>, Erdinç ALADAĞ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Van*

*Geliş tarihi: 18.12.2019*

*Kabul tarihi: 15.05.2020*

### **Öz**

Bu çalışmada süt endüstrisi atıksularından kaynaklanan peyniraltı suyunun koagülasyon/flokülasyon yöntemiyle kimyasal arıtımı amaçlanmıştır. Peyniraltı suyunun kimyasal arıtımı, jar testi deneyleriyle yürütülerek en iyi pH aralığında optimum koagülant cinsi ve dozu belirlenmiştir. pH (4,0-8,5) ve koagülant dozunun (0,25-2,0 g/L) KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) giderim verimine etkisini incelemek üzere kesikli deneyler yapılmıştır. Koagülant olarak demir sülfat, alüminyum sülfat (alum) ve kil (montmorillonit) kullanılmıştır. Optimum koagülant dozu 1,0 g/L ve pH 7,0 olarak belirlenmiştir. Kil, alum+kil, demirsülfat+kil için sırasıyla %88, %91 ve %92 KOİ giderim verimi ve %89, %93 ve %95 AKM (askıda katı madde) giderim verimi elde edilmiştir. Yapılan kimyasal arıtma deneylerinde montmorillonitin diğer koagülantlarla birlikte ön arıtım amacıyla kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Ancak su kirliliği kontrol yönetmeliğinde belirtilen deşarj standartları sağlanamadığı için kimyasal arıtımın sadece kendinden sonraki ünitenin yükünü hafifleteceği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Koagülasyon/flokülasyon, Koagülant, Peyniraltı suyu, Atıksu

### **The Use of Montmorillonite, A Natural Coagulant, for The Treatment of Whey by Coagulation/Flocculation Method**

#### **Abstract**

In this study, chemical treatment of whey originating from dairy industry wastewaters by coagulation/flocculation method was aimed. The chemical treatment of whey was carried out with jar test experiments and optimum coagulant type and dosage were determined in the best pH range. Batch experiments were performed to investigate the effect of pH (4.0-8.5) and coagulant dose (0.25-2.0 g /L) on COD (chemical oxygen demand) removal efficiency. Iron sulfate, aluminum sulfate (alum) and clay (montmorillonite) were used as coagulants. Optimum dose of coagulant was 1.0 g/L and pH 7.0. For clay, alum + clay, iron sulphate + clay, 88%, 91% and 92% COD removal efficiency and 89%, 93% and 95% SS (suspended solid) removal efficiency were obtained respectively. In the chemical treatment experiments, it was concluded that montmorillonite can be used together with other coagulants for pre-treatment. However, since the discharge standards specified in the water pollution control regulation could not be met, it was determined that chemical treatment would only relieve the load of the next unit.

**Keywords:** Coagulation/flocculation, Coagulant, Whey, Wastewater

<sup>\*</sup>Sorumlu yazar (Corresponding author): Tuba BAYRAM, [tubabayram@yyu.edu.tr](mailto:tubabayram@yyu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Endüstrilerin hızlı büyümesi ve kentleşmeden dolayı, çevresel ortamlarda toksik maddelerin salınımı giderek artmakta ve su kirliliği ciddi bir endişe kaynağı haline gelmektedir [1]. Organik maddeler (aromatik bileşikler, proteinler, yağ ve gres, fenoller, pestisitler, vb.) ve ağır metaller (arsenik, kadmiyum, kurşun, nikel vb.) alıcı ortamlarda olumsuz çevresel koşullara neden olmaktadır [2-3]. Bu sebeple atıksuların arıtımı konusunda çalışmaların yapılması gerekmektedir [4].

Biyolojik çeşitlilik için ciddi bir tehlike olan süt atıksuları her yıl, dünya çapında, 4-11 milyon ton arasında ortaya çıkmaktadır. Süt atıksularının arıtılmadan alıcı ortamlara deşarj edilmesinin yol açtığı ciddi sorunlardan biri de yağ ve gresin su yüzeyinde oksijen transferini engellemesi, çözülmüş oksijen tükenmesi ve daha sonra burada yaşayan hayvanlar ve bitkiler için olumsuz çevresel koşullara neden olmasıdır [5]. Diğer endüstrilerle karşılaştırıldığında, süt endüstrisi kirletici potansiyeli fazla olan büyük miktarda atıksu üreten endüstrilerden biridir [6-7].

Süt endüstrisi çiğ sütün farklı prosesler (pastörizasyon, soğutma, vb.) tarafından yoğurt, tereyağı, peynir gibi ürünlere dönüştürülmesini ve üretilmesini içermektedir. Peynir yapma sürecinde birçok adım vardır. Bunlar arasında sütün çökeltilmesi, lor haline getirilmesi, pişirilmesi, peynir kalıplarına lor koyulması ve kalıpların preslenmesi yer almaktadır. Bu aşamada en önemli atıksu kaynağı peyniraltı suyudur. Peyniraltı suyu kazein ve yağın süttten çökeltilecek alınması işleminde ortaya çıkan yeşilimsi sarı renkli bir sıvıdır. Bununla birlikte, peyniraltı suyu süt işleme tesislerinde çoğunlukla kurutulduktan sonra hayvan yemi olarak veya tarım ve gıda endüstrilerinde ham madde olarak yeniden kullanılmaktadır [8].

Peynir üretim endüstrisi, üç temel atıksu türünden sorumludur; i) peyniraltı suyu (peynir üretiminden kaynaklanan), ii) ikinci peyniraltı suyu (süzme peynir üretiminden kaynaklanmaktadır),

iii) peyniraltı suyu üretiminde kullanılan tankların ve boruların yıkanması sonucu oluşan atıksudur. Peyniraltı suyu bileşiminde yüksek kimyasal oksijen ihtiyacına (KOİ) neden olan laktöz (%70-75), çözümlü proteinler (%10-15), yüksek konsantrasyonlarda askıda katı madde, klorür ve sodyum tespit edilmiştir ve bu da potansiyel bir çevresel risk oluşturmaktadır [9].

Süt endüstrisi atıksularının özellikleri, nihai ürünlere, sistem tipine ve üretim planında kullanılan çalışma yöntemlerine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Son on yılda, süt endüstrisi atıksularının arıtılması için çeşitli teknolojiler geliştirilmiştir. Süt endüstrisi atıksuları yüksek oranda biyolojik olarak parçalanabilmesi nedeniyle biyolojik atıksu arıtma sistemleri ile etkin bir şekilde arıtmakta ancak uygun şekilde arıtılmadığında çevresel bir tehlikeye neden olabilmektedir [10].

Aerobik ve anaerobik prosesler, koagülasyon/flokülasyon yöntemleri, nanofiltrasyon, ters ozmoz ve membran prosesleri gibi farklı arıtma yöntemleri, atıksuda bulanıklığa neden olan askıda ve kolloidal partiküllerin gideriminde kullanılmaktadır [11].

Koagülasyon-flokülasyon, flotasyon gibi kimyasal arıtma yöntemleri atıksu arıtımında organik madde, bulanıklık, ağır metal, renk giderimi için kullanılmaktadır [12]. Kimyasal arıtma prosesleri biyolojik sistemler ile karşılaştırıldığında, işletiminin kolay olması, organik maddenin çökeltilecek giderilebilmesi, atıksu debisi ve içeriğinden etkilenmemesi gibi avantajları nedeniyle endüstriyel atıksu arıtımında tercih edilmektedir [13].

Kimyasal olarak sentezlenen koagülantlar (inorganik polimerler ve alüminyum tuzları) düşük maliyetleri nedeniyle atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu koagülantlar fazla çamur üretimine neden olmakta ve doğası gereği parçalanamadıkları için birçok çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle kirlilik yükü yüksek endüstriler tarafından kullanılan geleneksel koagülantların yerini alabilecek etkili, ekonomik ve çevre dostu koagülant maddeler için

çalışmalar yapılmaktadır. Atıksu arıtma maliyetinin düşürülmesi, çevresel sürdürülebilirlik açısından son zamanlarda büyük önem kazanmıştır [14].

Farklı bölgelerden elde edilen kil grubu minerallerin, toksik kirleticilerin gideriminde kullanılabileceğine dair çalışmalar bulunmaktadır [15-16].

Bu çalışma kapsamında Atatürk Üniversitesi'nde bulunan pilot süt fabrikasından atıksu numuneleri alınmıştır. İlk önce atıksuyun karakterizasyon çalışması için analizler yapılmıştır. Koagülasyon/flokülasyon yönteminde kullanılan kimyasallara alternatif olarak doğal bir kil olan montmorillonitin koagülant olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Koagülasyon/flokülasyon deneyleri jar-test cihazı ile yapılmıştır. Koagülant olarak demir sülfat, alum ve kil kullanılarak optimum pH değerleri tespit edilmiştir. KOİ giderim veriminin deşarj kriterlerini sağlayıp sağlamadığını kontrol etmek için Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği'nde verilen deşarj limitleri ile değerlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Atıksu Kaynakları ve Karakterizasyonu

Süt üretimi yapan tesislerin atıksularının karakterizasyonu üretim prosesine göre değişir. Atıksuların nispeten düşük pH ve yüksek tuzluluk oranı, peynir üretimi sırasında ilave edilen NaCl miktarına bu endüstride üretilen peyniraltı suyunun türüne ve bağlıdır [17].

Peyniraltı suyunun fiziksel ve kimyasal karakterizasyon değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Peyniraltı suyunun pH değerinin 3,3-9,0; askıda katı madde (AKM), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) değerleri ise sırasıyla 0,1-22,0, 0,01-1,7 ve 0,006-0,5 g/L aralığında olduğu bildirilmiştir. TN ve TP içeriği nedeniyle peynir atıksuları özellikle göller ve yavaş hareket eden nehirler gibi alıcı ortamlarda önemli bir ötrofikasyon riski oluşturmaktadır. Ayrıca, 0,06 ile 0,27 g/L arasında değişen amonyum azotu (NH<sub>4</sub>-N) konsantrasyonu, sucul yaşam için toksik etkilere neden olabilir [18-19].

**Çizelge 1.** Peyniraltı suyunun fiziksel ve kimyasal karakterizasyon değerleri

Parametre	[20]	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]
pH	5	-	4,9	4,2	3,8-6,3	6-6,5
TKM (g/L)	56,8	-	66,83	70,9	-	55-65
AKM (g/L)	21,82	-	22,15	-	4,1-10	10-15
TN (g/L)				1,76	-	
NO <sub>3</sub> (mg/L)	-	9,1	-	-	-	10
TKN (g/L)	0,5	1,46 ±0,26	1,49	-	-	0,01-0,02
NH <sub>4</sub> -N (g/L)	0,27	0,064	0,17	-	-	-
TP(g/L)	-	0,38±0,05	-	-	-	-
KOİ (g/L)	75,8	60-80	74,2	102,1	60,3-66,7	50-70
BOİ (g/L)	40-60	30-50	-	-	35,5	27-36

### 2.2. Kullanılan Kil ve Özellikleri

Bu çalışmada, koagülant olarak doğal kil kullanılmıştır. Montmorillonit (MMT), minerolojik özelliğine göre simektit grubuna, kimyasal olarak silikat içerikli gruba, yapısına göre kristal kil minerallerinin üç tabakalı kil minerali grubuna dahildir. Kil, 110 °C'de etüvde kurutulmuştur. Çalışma boyunca kil konsantrasyonu 1,0 g/L sabit tutulmuştur.

### 2.3. Analitik Yöntem

Atıksu karakterizasyonunun belirlenmesi; kanalizasyon sistemleri, arıtma tesisleri ve deşarj ünitelerinin tasarımı ve işletimi için gereklidir [26]. Peyniraltı suyu karakterizasyon parametreleri (pH, sıcaklık, iletkenlik, AKM, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, KOİ, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, TOK, TN), standart yöntemlere göre analitik teknikler kullanılarak laboratuvarında analiz edilmiştir. Peyniraltı suyu karakterizasyon

parametrelerinin analitik yöntemi, birimi ve kısaltması Çizelge 2’de gösterilmiştir [27].

**Çizelge 2.** Peyniraltı suyu atıksu parametrelerinin analitik yöntemi, birimi ve kısaltması

Parametre	Kısaltma	Birim	Analitik Metod
Sıcaklık	T	°C	Multimetre probu
pH	pH	-	Potansiyometrik/pH probu
İletkenlik	Eİ	mS/cm	Multimetre probu
Askıda katı madde	AKM	mg/L	Fotometrik yöntem (Spektrofotometre ile)
Sülfat	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	Spektrofotometrik Yöntem
Fosfat	PO <sub>4</sub> -P	mg/L	Spektrofotometrik Yöntem
Toplam azot	TN	mg/L	Katalitik termal dekompozisyon yöntemi
Nitrat azotu	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	İyon Kromatografisi
Klorür	Cl <sup>-</sup>	mg/L	Titrimetrik Yöntem
Amonyum azotu	NH <sub>4</sub> -N	mg/L	Spektrofotometrik Yöntem
Kimyasal oksijen ihtiyacı	KOI	mg/L	Closed Reflux Metod, Titrimetrik Yöntem
Toplam organik karbon	TOK	mg/L	TOC-L katalitik oksidasyon yöntemi

Tesiste bir günde yaklaşık 900 kg süt ürünleri üretilmektedir. Ayrıca, üretim sonucu tesisten çıkan günlük atıksu miktarı 1,5-2 m<sup>3</sup> atıksu/ton’dur. Atıksu numuneleri analiz edilinceye kadar 4 °C’de bekletilmiştir ve ISO 17025 kalite sistemiyle akredite edilmiş bir laboratuvarında analiz edilmiştir (Çizelge 3).

**Çizelge 3.** Pilot tesisten alınan peyniraltı suyunun karakterizasyonu

Parametre	Konsantrasyon
pH	4,6
T (°C)	10,8
Eİ (mS/cm)	23
KOI (mg/L)	89095
AKM (mg/L)	25000
TOK (mg/L)	34508
NO <sub>3</sub> (mg/L)	16,63
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	1237,17
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	267,53
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	1453,54
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	62,132
TN (mg/L)	1399

Koagülasyon/flokülasyon deneyleri için dörtlü jar-test cihazı kullanılmıştır. Atıksuyun pH ayarı için 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> veya 1 N NaOH kullanımı tercih edilmiştir. Alum, demirsülfat ve montmorillonit kili koagülant olarak kullanılmıştır. Deneyler, optimum koagülant cinsi ve dozajını veren en iyi pH aralığında yapılmıştır. 500 ml peyniraltı suyu numunesi bulunan behere seçilen koagülantlar dozlanmıştır. Jar testi cihazında 100 rpm’de 5 dakika hızlı karıştırma, 20 rpm’de 15 dakika yavaş karıştırma işleminden sonra peyniraltı suyunun çöktürülmesi için 30 dakika bekletilmiştir. Daha sonra atıksuyun süpernatant kısmından alınan örneklerde Standart Metotlara [27] göre KOİ, AKM, pH analizleri yapılmıştır. Koagülasyon parametrelerinin optimizasyonu için jar testleri 4,0-8,5 aralığında ve koagülant dozajı 0,25-2,0 g/L aralığında belirlenen değerlerde yürütülmüştür. Deneysel çalışmanın ilk aşamasında 1,0 g/L alum, demirsülfat ve montmorillonit kili kullanıldığında pH değeri 4,0, 5,5, 7,0 ve 8,5’a ayarlanmıştır. Sonraki aşamada ise belirlenen optimum pH değeri kullanılarak optimum koagülant dozajını belirlemek amacıyla 0,25, 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 g/L konsantrasyonlarında koagülant kullanılmıştır.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Süt endüstrisinden kaynaklanan peyniraltı suyunun kirlilik yükünün yüksek olması nedeniyle alıcı ortama verilmeden önce arıtılması ve Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği’nde [28] belirtilen deşarj standartları sağlandıktan sonra deşarj edilmesi gerekmektedir. Yönetmelikte bulunan süt üretimi yapan işletmelerin, atıksularının arıtımı yapıldıktan sonra alıcı ortamlara verildiğinde gereken deşarj standartları Çizelge 4’de verilmiştir.

**Çizelge 4.** Sektör gıda sanayi (Süt ve süt ürünleri) [27]

Parametreler	Birim	Komposit Numune 2 Saatlik	Komposit Numune 24 Saatlik
KOI	(mg/L)	150	160
Yağ ve gres	(mg/L)	60	30
pH		6-9	6-9

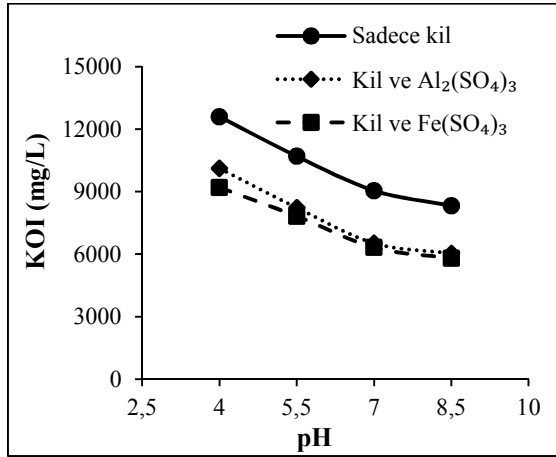
Literatürde peyniraltı suyunun arıtımında kullanılan koagülantlar ve uygulamaları koşulları Çizelge 5’de verilmiştir.

**Çizelge 5.** Peyniraltı suyunun arıtımında kullanılan koagülantlar ve uygulama koşulları [29]

Koagülant cinsi ve dozajı	pH	T (°C)	Giderim (%)			
			KOİ	BOİ	TKN	P
Alum (1,0 g/L)	7,0	10	35	36	44	77
Demirsülfat (0,25 g/L)	8,5	10	43	67	43	89
FeCl <sub>3</sub> (0,25 g/L)	4,4	10	32	23	19	14

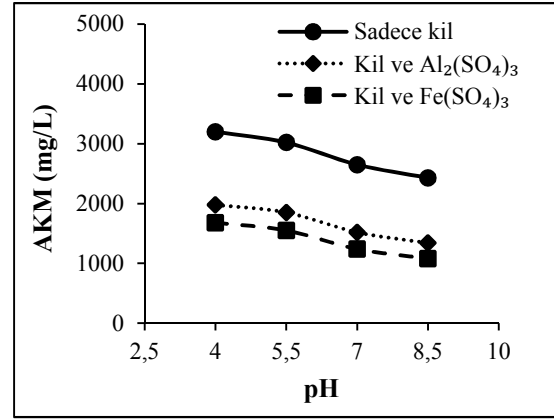
### 3.1. pH Etkisi

DeneySEL çalışmada her atıksu numunesinin başlangıç pH değeri 6-8 aralığındadır. Asidik veya bazik ortamlara kil eklendiğinde zamana bağlı olarak pH değeri değişmektedir. Koagülant ilavesinin, çözeltinin pH'sini düşüren H<sup>+</sup> iyonlarının salınmasına yol açtığı iyi bilinmektedir. pH azalmasının nedeni; H<sup>+</sup> iyonlarla SiO<sub>2</sub>, AlO<sub>3</sub> gruplarındaki (-) yüklerin kilin yüküyle yer değiştirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [30]. Alum, demirsülfat ve montmorillonit kili kullanılarak yapılan jar testi sonucunda pH'nın KOİ ve AKM giderimine etkisi Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmiştir.

**Şekil 1.** KOİ giderimine pH değerinin etkisi

Bütün koagülantlar için optimum pH değeri 7,0 olarak bulunmuştur. Üç farklı koagülant kullanılarak yapılan jar testi deneyinde pH 7,0 değerinde 1,0 g/L montmorillonit kili+FeSO<sub>4</sub>

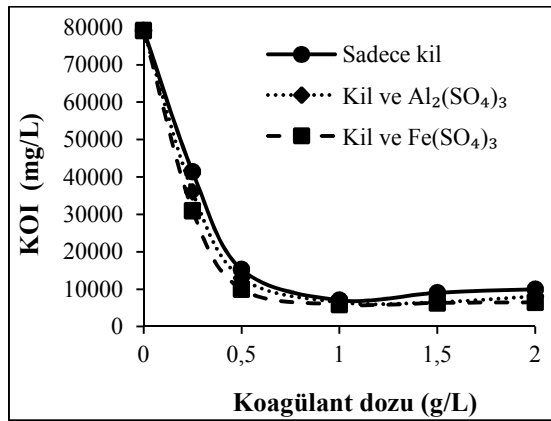
kullanıldığında en yüksek KOİ giderme verimi (%92) elde edilmiştir. Süt endüstrisi atıksularına 0,2-1,8 g/L aralığında koagülant olarak alum ve demir sülfat uygulanan bir çalışmada pH 5,0'de sırasıyla %68 ve %62 KOİ giderme verimi elde edilmiştir [31]. Koagülant olarak kaolinit kilinin kullanıldığı diğer bir çalışmada ise pH 7,0 değerinde 1,0 g/L kaolinit dozunda %94 KOİ giderim verimi bildirilmiştir. Maksimum KOİ gideriminin elde edildiği kaolinit dozunda (1,0 g/L) %17 oranında AKM giderimi sağlanmıştır [32].

**Şekil 2.** AKM giderimine pH değerinin etkisi

Sadece kil, Alum+kil, demirsülfat+kil kullanılarak KOİ giderme verimleri sırasıyla, %88, %91 ve %92 olarak bulunurken, AKM giderme verimleri sırasıyla %89, %93 ve %95 olarak bulunmuştur. Özellikle montmorillonit kili demir sülfat ile birlikte kullanıldığında yüksek giderim verimleri elde edilmiştir. Yapılan deneylerde, montmorillonitin suda bulunan çözünmüş, askıda, koloidal maddelerin koagülasyon-flokülasyon işlemi ile en iyi çöktürülmesinin sağlandığı koagülant olarak belirlenmiştir. Peyniraltı suyunun kimyasal arıtımı ilgili yapılan bir çalışmada koagülasyon/flokülasyon prosesinde koagülant olarak alum demir (III) klorür ve demir (II) sülfat kullandığında maksimum KOİ verimi sırasıyla, %28, %26 ve %25 olarak bulunurken, AKM giderme verimleri ise sırasıyla %83, %86 ve %74 olarak rapor edilmiştir [33].

### 3.2. Koagülant Dozunun Etkisi

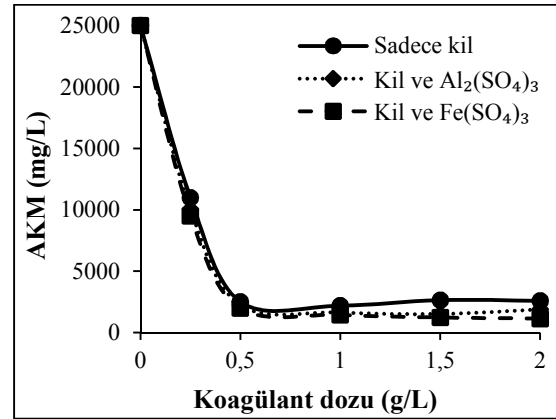
Optimum pH aralığında en uygun koagülant cinsi belirlendikten sonra koagülant dozajının tespiti için değişik konsantrasyonlarda koagülant dozajları ile kimyasal arıtılabilirlik deneyleri yürütülmüştür. Çalışmada en düşük koagülant miktarında %48 KOİ giderme verimi, 2 gr/L dozajında ise %87 KOİ giderme veriminin elde edildiği Şekil 3’de görülmektedir. Ayrıca 1,0 g/L koagülant dozajında elde edilen verim 1,5 g/L koagülant dozajında elde edilen verime çok yakındır. Bu nedenle, ekonomik etkinlik göz önüne alındığında, 1,0 g/L konsantrasyonu optimum konsantrasyon olarak seçilmiştir. 1,0 g/L koagülant (montmorillonit+FeSO<sub>4</sub>) dozajında %92 oranında KOİ giderim verimi elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. KOİ giderimine koagülant dozunun etkisi

Sadece kil, alum+kil, demirsülfat+kil dozajının AKM giderimine etkisi Şekil 4’de gösterilmiştir. Optimum dozlarda sadece kil, alum+kil, demirsülfat+kil için elde edilen AKM giderim verimleri sırasıyla %90, %91 ve %92 olarak bulunmuştur (Şekil 4). Ayrıca 0,5 g/L koagülant dozajında elde edilen verim daha yüksek koagülant dozajında elde edilen verime çok yakındır. Bu nedenle, AKM gideriminde ekonomik etkinlik göz önüne alındığında, 0,5 g/L konsantrasyonu optimum konsantrasyon olarak seçilmiştir. Peyniraltı suyunun kimyasal arıtımı için Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>H<sub>2</sub>O kullanılarak yapılan bir çalışmada %50, Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>H<sub>2</sub>O kullanıldığında ise %52 KOİ giderme verimi elde edilmiştir. Koagülant olarak

PAC, FeSO<sub>4</sub>, Al(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.12H<sub>2</sub>O kullanıldığında pH 5,0-10 aralığında 100-5000 mg/L arasındaki koagülant dozlarında her üç koagülant için optimum pH 8,0 olarak belirlenmiştir [34].



Şekil 4. AKM giderimine koagülant dozunun etkisi

## 4. SONUÇ

Süt endüstrisinden kaynaklanan peyniraltı suyunun koagülasyon/flokülasyon yöntemiyle arıtılması incelenmiştir ve optimum işletme şartları belirlenmiştir. Üç farklı koagülantın farklı dozajlarda ve farklı pH’larda maksimum KOİ ve AKM giderim verimleri incelenmiştir. Optimum koagülant dozu 1,0 g/L ve pH 7,0 olarak belirlenmiştir. Sadece kil, Alum+kil, demirsülfat+kil için sırasıyla %88, %91 ve %92 KOİ giderim verimi ve %89, %93 ve %95 AKM giderim verimi elde edilmiştir. Koagülantların KOİ giderme mekanizması esas olarak şarj nötralizasyonu ve adsorpsiyonu nedeniyle gerçekleşmiştir. KOİ giderim verimliliğindeki artış, koloidal partikülleri destabilize eden çeşitli hidroliz türlerinin konsantrasyonundaki artıştan kaynaklanmaktadır. Montmorillonit kilinin koagülasyon/flokülasyon prosesinde kullanılmasının olumlu sonuçlarının elde edilmesi bu kilin atıksuların arıtımında kullanımının artırılmasını ve bu alanda daha fazla araştırma yapılmasını sağlamaktadır. Ayrıca bu malzemenin atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılan koagülant ve flokülantlara alternatif bir malzeme olabileceği düşünülmektedir.



## 5. KAYNAKLAR

1. Porwal, H.J., Mane, A.V., Velhal, S.G., 2015. Biodegradation of Dairy Effluent by Using Microbial Isolates Obtained from Activated Sludge, *Water Resources and Industry*, 9-1-15.
2. Öztürk, D., Aladağ, E., Yılmaz, A.E., Boncukcuğlu, R., Bayram, T., 2019. Mezbaha Atıksularının Karakterizasyonu ve Arıtılabilirliğinin Değerlendirilmesi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(2), 738-748.
3. Chokshi, K., Pancha, I., Ghosh, A., Mishra, S., 2016. Microalgal Biomass Generation by Phycoremediation of Dairy Industry Wastewater: An Integrated Approach Towards Sustainable Biofuel Production, *Bioresource Technology*, 221, 455-460.
4. Karnib, A., 2014. A Methodological Approach for Quantitative Assessment of the Effective Wastewater Management: Lebanon as a Case Study, *Environmental Processes*, 1(4), 483-495.
5. Rosa, D.R., Duarte, I.C.S., Saavedra, N.K., Varessche, M.B., Zaiat, M.C., 2009. Performance and Molecular Evaluation of an Anaerobic System with Suspended Biomass for Treating Wastewater With High Fat Content After Enzymatic Hydrolysis, *Bioresource Technology*, 100, 6170-6176.
6. Sarkar, B., Chakrabarti, P.P., Vijaykumar, A., Kale, V., 2006. Wastewater Treatment in Dairy Industries Possibility of Reuse, *Desalination*, 195(1-3), 141-152.
7. Aboubaraka, A.E., Aboelfetoh, E.F., Ebeid, E.Z.M., 2017. Coagulation Effectiveness of Graphene Oxide for the Removal of Turbidity from Raw Surface Water, *Chemosphere*, 181, 738-746.
8. Kılıç, A., 2006. Süt Endüstrisi Atıksularının Arıtımında Ardışık Kesikli Reaktörde (SBR) Hareketli Biofilm Uygulaması [thesis]. Selçuk University, Konya.
9. Güven, G., Perendeci, A., Tanyolaç, A., 2008. Electrochemical Treatment of Deproteinated Whey Wastewater and Optimization of Treatment Conditions with Response Surface Methodology, *Journal of Hazardous Materials*, 157, 69-78.
10. Gutierrez, J.L.R., Encina, P.A.G., Polanco, F.F., 1991. Anaerobic Treatment of Cheese Production Wastewater Using UASB Reactor. *Bioresour Technol.*, 37(3),271-6.
11. Samal, K., Dash, R.R., Bhunia, P., 2017. Performance Assessment of a Canna Indica Assisted Vermifilter for Synthetic Dairy Wastewater Treatment, *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 363-374.
12. Mateus, G.A.P., Formentini-Schmitt, D.M., Nishi L., Fagundes-Klen, M.R., Gomes, R.G., Bergamasco, R., 2017. Coagulation/Flocculation with Moringa Oleifera and Membrane Filtration for Dairy Wastewater Treatment. *Water Air Soil Pollut.* 228:342.
13. Özmetin, E., 2019. Süt Endüstrisi Atıksularının Kimyasal Arıtımının Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(4), 1968-1976.
14. Sharma, B.R., Dhuldhoya, N.C., Merchant, U. C., 2006. Flocculants-an Ecofriendly Approach. *Journal of Polymers and the Environment*, 14, 195-2002.
15. Ingram, D.S., Vince-Prue, D., Gregory, P.J., 2003. *Science and the Garden the Scientific Basis of Horticultural Practice*. Blackwell Science Ltd., Oxford.
16. Li, H., Sheng, G., Teppen, B.J., Johnston, C.T., Boyd, S.A., 2003. Sorption and Desorption of Pesticides by Clay Minerals and Humic Acid-Clay Complexes. *Soil Science Society of America Journal* 67, 122-131.
17. Orhon, D., Görgün, E., Germirli, F., Artan, N., 1993. Biological Treatability of Dairy Wastewaters. *Water Research*, 27, 625-633.
18. Prazeres, A.R., Carvalho, F., Rivas, F.J., 2012. Cheese Whey Management: A Review, *J. Environ Manage*, 110, 48-68.
19. Farizoglu, B., Keskinler, B., Yildiz, E., Nuhoglu, A., 2007. Simultaneous Removal of C, N, P From Cheese Whey by Jet Loop Membrane Bioreactor (JLMBR). *J. Hazard Mater*, 146(1-2), 399-407.
20. Ghaly, A.E., Singh, R.K., 1989. Pollution Potential Reduction of Cheese Whey Through Yeast Fermentation. *Appl Biochem Biotechnol*, 22(2),181-203.
21. Malaspina, F., Cellamare, C.M., Stante, L., Tilche, A., 1996. Anaerobic Treatment of

- Cheese Whey With Downflow-Upflow Hybrid Reactor. *Bioresour Technol*, 55(2),131–9.
22. Ghaly, A.E., Kamal, M.A., 2004. Submerged Yeast Fermentation of Acid Cheese Whey for Protein Production and Pollution Potential Reduction. *Water Res*, 38(3),631–44.
  23. Ferchichi, M., Crabbe, E., Gil, G.H., Hintz, W., Almadidy, A., 2005. Influence of Initial Ph on Hydrogen Production from Cheese Whey. *J. Biotechnol*, 120(4),402–9.
  24. Blonskaja, V., Vaalu, T., 2006. Investigation of Different Schemes for Anaerobic Treatment of Food Industry Wastes in Estonia. *Proc Est Acad Sci*, 55(1), 14–28.
  25. Ebrahimi, A., Najafpour, G.D., Mohammadi, M., Hashemiyeh B., 2010. Biological Treatment of Whey in An UASFF Bioreactor Following A Three-Stage RBC. *Chem. Ind. Chem. Eng*, 16(2),175–82.
  26. Erkuş, A., Oygün, E., Türkmenoğlu, M., Aldemir, A., 2018. Boya Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23 (3), 308-319.
  27. APHA (American Public Health Association), 1999. *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater*, 20<sup>th</sup> ed., Washington D.C.
  28. Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği (SKKY), 2004. *Resmi Gazete*, Resmi Gazete Tarihi: 31.12.2004, Resmi Gazete Sayısı: 25687.
  29. Rivas, J., Prazeres, A.R., Carvalho, F., Beltran F., 2010. Treatment of Cheese Whey Wastewater: Combined Coagulation-Flocculation and Aerobic Biodegradation, *J. Agric. Food Chem*. 58, 7871–7877.
  30. Alkan, M., Demirbas, Ö., Doğan, M., 2005. Zeta Potential of Unexpanded and Expanded Perlite Samples in Various Electrolyte Media, *Microporous and Mesoporous Materials*, 84, 192-200.
  31. Loloie, M., Alidadi, H., Nekonam, G., Kor, Y., 2014. Study of the Coagulation Process in Wastewater Treatment of Dairy Industries. *Int J Env Health Eng*. 3, 12.
  32. Haşçakır, B., Dölgen, D., 2008. Kil Minerallerinin Atıksu Arıtımında Kullanılabilirliği: Kaolinit ile Organik Madde Giderimi, *Ekoloji*, 17(66), 47-54.
  33. Gürtekin, E., 2011. Koagülasyon/Flokülasyon Prosesiyle Peyniraltı Suyunun Fizikokimyasal Arıtılabilirliği, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11, 17-22.
  34. Pala, A., Sponza, D., 1994. Bir Süt Endüstrisi Atıksularının Karakterizasyonu ve Arıtma Sisteminin İncelenmesi. *İTÜ 4. Endüstriyel Kirlenme Sempozyumu* 94, 55-65, İstanbul.

## Metamalzeme Yapılarıyla Fraktal Anten Parametrelerinin İyileştirilmesi

Emin ÜNAL<sup>\*1</sup>, Ceren DOĞAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hatay

Geliş tarihi: 06.07.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Bu çalışmada 5,47 GHz'de çalışan bir fraktal anten tasarımı yapılmış ve bu antenin yönlülüğünün, kazancının ve verimliliğinin Metamalzeme yapılar kullanılarak iyileştirilmesi amaçlanmıştır. FIT tabanlı simülasyon programı yardımıyla dairesel şekillerden oluşmuş ve her daire arasındaki oran sabit 0,65 olan bir fraktal anten tasarlanmıştır. Her biri 38 mm x 38 mm boyutunda, 2x4 birim hücreli eşkenar dörtgen yapılardan oluşmuş olan MTM yapısı yine aynı simülasyon programında tasarlanmıştır. MTM yapıların simülasyon sonucunda elde edilen S11 ve S21 parametre değerleri kullanılarak, yapının etkin dielektrik sabiti, etkin manyetik geçirgenliği ve kırılma indisi hesaplanmış ve hesaplanan bu değerlerin negatif olduğu görülmüştür. Metamalmesiz fraktal antenin S11 değeri 5,47 GHz'de -16,973 dB iken, 2 MTM yapısı ile bu değer -25,908 dB değerine kadar düşmüştür. Ayrıca, antenin yönlülüğü 6,65 dBi'den 9,67 dBi'ye, kazancı ise 1,19 dB'den 5,99 dB'ye yükselmiştir. Fraktal anten ve MTM'li yapının fabrikasyonları yapılmış olup, farklı sayılarda MTM yapısı anten üzerine 90 derece gelecek şekilde monte edilmiş ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birbiri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Metamalzeme, Fraktal anten, Minyatürleşme, Ultra geniş bant

### Improvement of Fractal Antenna Parameters with Metamaterial

#### Abstract

In this study, a fractal antenna operating at 5.47 GHz has been designed and it is aimed to improve the directivity, gain and efficiency of this antenna by using Metamaterials. With the help of a FIT-based simulation program, a fractal antenna consisting of circular shapes with a fixed ratio of 0.65 between each circle is designed. The MTM structure, which is composed of 2x4 unit cell rhombus structures, each of 38 mm x 38 mm, is designed in the same simulation program. Using the S11 and S21 parameter values obtained from the simulation of MTM structures, effective dielectric constant, effective magnetic permeability and refractive index of the structure are calculated and these values are found to be negative. While the S11 value of the fractal antenna without MTM is -16.973 dB at 5.47 GHz, it has decreased to -25.908 dB with 2 MTM structures. In addition, the antenna's directivity has increased from 6.65 dBi to

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Emin ÜNAL, [emin.unal@iste.edu.tr](mailto:emin.unal@iste.edu.tr)

9.67 dBi and its gain has increased from 1.19 dB to 5.99 dB. Fractal antenna and MTM structure are fabricated, different numbers of MTM structure have been mounted on antenna at 90 degrees and measurement results are obtained. Measurement results and simulation results are compared and it is seen that the simulation results and the measurement results are in good agreement with each other.

**Keywords:** Metamaterial, Fractal antenna, Miniaturization, Ultra-wide band

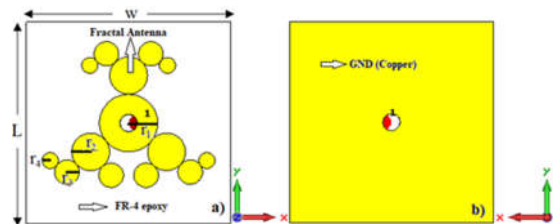
## 1. GİRİŞ

Fraktal kelimesi ilk olarak Polonya asıllı matematikçi Benoit Mandelbrot tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır [1]. Fraktal yapılar bir şeklin orantılı olarak küçültülmesi veya büyütülmesi ile elde edilen yapıların periyodik olarak tekrarlanmasıyla elde edilen karmaşık yapılardır. Fraktal şekillerin kullanım alanlarından birisi de antenlerdir. Fraktal anten geleneksel antenlere kıyasla daha fazla avantaja sahiptir. Düşük maliyetli olan bu antenler küçük kesit alanına, çoklu rezonans frekansına ve büyük bant genişliğine sahiptirler. Bu antenlerin bir başka avantajı ise empedans eşleştirmeye gerek duymamasıdır. Dezavantajları ise karmaşık yapıya sahiptir ve bazı durumlarda düşük kazançta neden olabilirler. Fraktal geometrilerin yineleme sayısı arttıkça rezonans frekansları arasındaki mesafe azalmaktadır [2]. Fraktal antenler boşluk doldurma özelliği sayesinde minyatürleşmeye neden olurken, kendine benzerlik özelliği ile de geniş bir frekans dizisine sahiptirler. Savunma, askeri, uzay iletişim sistemleri, Wi-Fi, kablosuz yerel ağı (WLAN), mobil iletişim sistemleri çoklu frekans bandında çalışabilmesi için geniş bantlı antenlere ihtiyaç duyar [3].

Fraktal antenlerin yineleme sayısı ile ilgili 2013 yılında Jena ve arkadaşları Sierpinski Halı geometrisine dayanan fraktal anten tasarımı yapmış ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda yineleme sayısı arttıkça antenin kazancında iyileşme meydana geldiği görülmüştür [4]. 2015 yılında yapılan diğer bir çalışmada ise fraktal tabanlı mikroserit yama anteni tasarlanmış ve bunun sonucunda çoklu rezonans elde edilmiştir. Tasarlanan antenin Ultra Geniş bant (UWB) uygulamaları için kullanışlı olduğu ifade edilmiştir [5]. Başka bir çalışmada ise Ultra geniş bant altıgen fraktal anten tasarımı,

üretimi, ölçümü yapılmıştır. Bu anten tasarımında fraktal geometrisi, kenarlarında Koch kar tanesi bulunan altıgen şekil kullanılarak elde edilmiştir. Antenin bant genişliğinin ve kazancının fraktal geometri sayesinde arttığı görülmüştür [6]. CPW beslemeli UWB Gosper adası altıgen monopol anten tasarımı yapılmış ve standart antene kıyasla bant genişliğinin arttığı görülmüştür [7]. Madhav ve arkadaşları 2018 yılında U ve W şeklinde fraktal anten tasarlamışlardır. U ve W şeklindeki yuvaların atırılması ile çok bantlı bir yapı elde edilmiştir [8]. Yong ve Shaobin, 2008 yılında yaptıkları çalışmada kare yapıların içerisinde, kare kenarlarının yarısına eşit yarıçaplı dairesel parçaları çıkartarak elde ettikleri yeni taç kare fraktal anten yapısını kullanmışlardır. Bu çalışmada, yineleme sayısı arttıkça rezonans sayısının arttığı not edilmiş ve ayrıca bant genişliğini kontrol etmenin mümkün olduğu ifade edilmiştir [9].

## 2. MATERYAL VE METOT



Şekil 1. Fraktal antenin görünümü; (a) ön, (b) arka

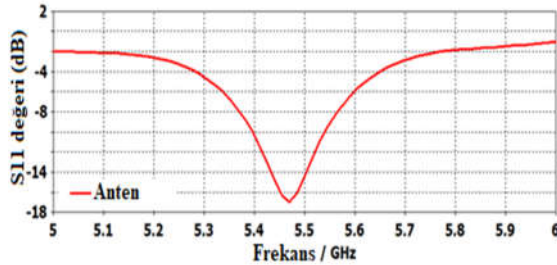
Şekil 1'de görülen fraktal antenin boyutları Çizelge 1'de verilmiştir. Fraktal antenin arka yüzeyinde kullanılan 35 mm x 35 mm bakır düzlemin kalınlığı 0,035mm ve elektriksel iletkenliği  $5,8001 \times 10^7$  S/m'dir. Dielektrik malzeme olarak ise iyi performansa ve düşük maliyete sahip olan 1,6 mm kalınlığında,  $\epsilon_r=4,4$ ,  $\mu_r=1$  ve dielektrik kayıp tanjantı  $\delta\epsilon=0,02$  olan FR4-epoxy malzemesi seçilmiştir. Besleme için en

büyük dairenin ortasından 1,5 mm yarıçapında oyuk açılmış ve fraktal şekil ile arkadaki metal düzleme temas edecek şekilde port atanmıştır.

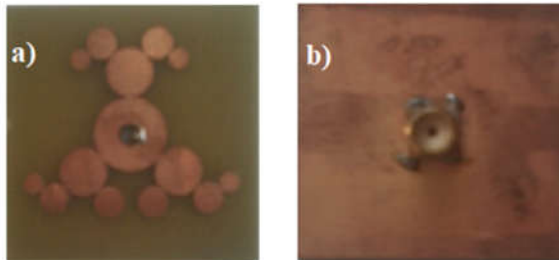
**Çizelge 1.** Fraktal antenin 5,47 GHz için boyutları

Anten parametreleri	Boyut
Frekans	5,47 GHz
Fraktal şekil, büyük daire ( $r_1$ )	5 mm
Fraktal şekil küçük daire ( $r_2$ )	5x0,65 mm
$r_3$	2,112 mm
$r_4$	1,373 mm
Plaka uzunluğu (L)	35 mm
Plaka genişliği (W)	35 mm
Plaka kalınlığı	1,635 mm

Tasarımı yapılan fraktal anten FIT tabanlı simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiş ve yansımaya katsayısı (S11) Şekil 2’de görüldüğü gibi, 5,47 GHz’de -16,947 dB olarak elde edilmiştir. S11 grafiği aynı zamanda antenin bant genişliğinin belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Önerilen Fraktal antenin bant genişliği (S11<-10 dB) yaklaşık olarak 146 MHz’dir.

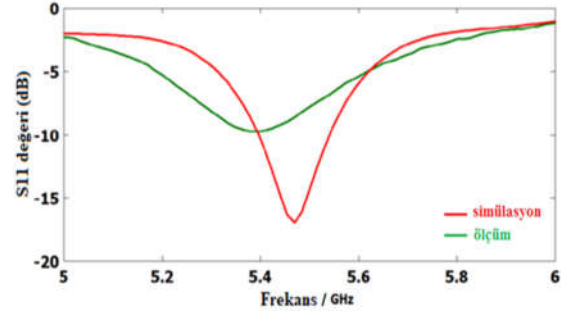


**Şekil 1.** Fraktal antenin sayısal olarak elde edilen S11 grafiği



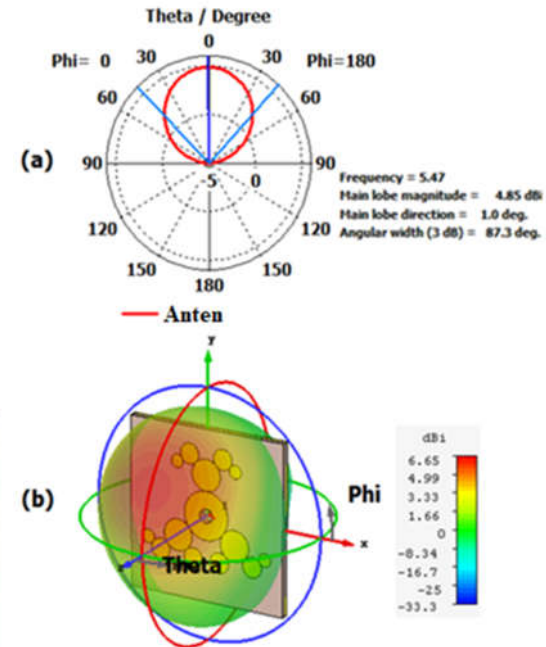
**Şekil 2.** Üretilen anten görünümü (a) ön, (b) arka

Üretimi gerçekleştirilen fraktal antenin ön ve arka yüzü Şekil 3’de görülmektedir. Önerilen fraktal anten için yansımaya katsayısının sayısal ve ölçüm sonuçları Şekil 4’te verilmiştir. Rezonans frekansındaki kayma üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.



**Şekil 4.** Fraktal antenin sayısal ve deneysel S11 grafiği

Antenin verimini, yönlülüğünü ve kazancını belirleyebilmek için antenin radyasyon örüntüsü de incelenmelidir. Şekil 5’de antenin 2 ve 3 boyutlu uzak alan ışınması verilmiştir.

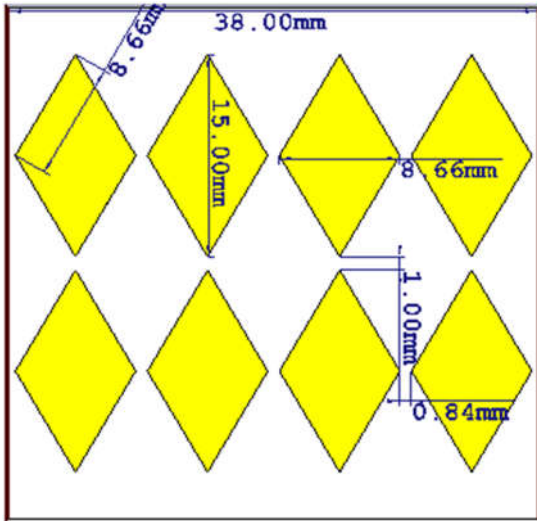


**Şekil 5.** Fraktal antenin Phi=0 derecede uzak alan ışınma eğrisi (a) 2 boyutlu (b) üç boyutlu

Şekil 5a incelendiğinde, antenin ana lobu için ışınma büyüklüğü,  $\Phi = 0$  derecede, 4,85 dBi, hüzmeye açısı  $87,3^\circ$  olarak görülmektedir, ancak yan loblarda ışınma görülmektedir. Antenin yönlülüğü ise Şekil 5b'de görüldüğü gibi 6,65 dBi ve kazancı 1,19 dB'dir.

### 3. MTM TASARIMI

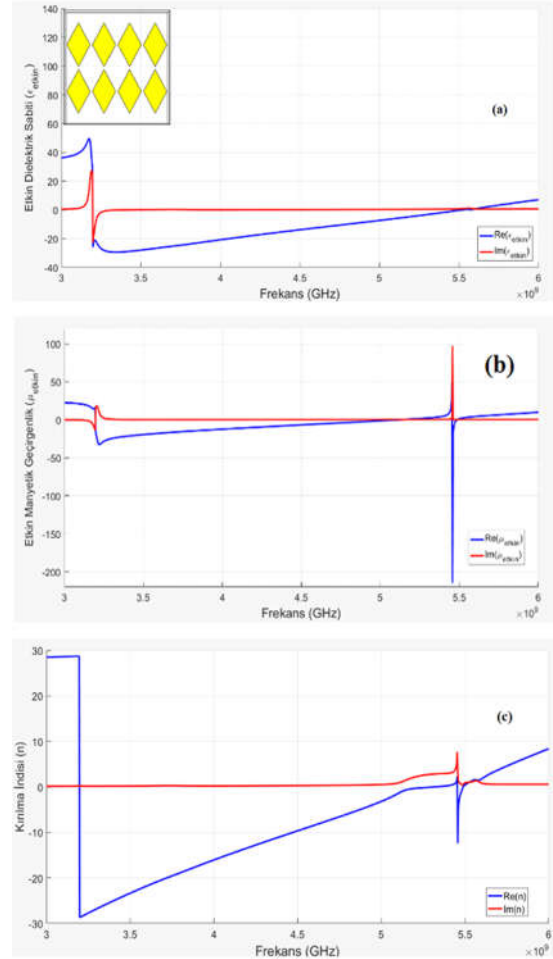
Metamalzeme (MTM); doğada bulunmayan, laboratuvar ortamında yapay olarak üretilen, periyodik yapılardan meydana gelen malzemelerdir. Elektrik alan vektörü ( $\vec{E}$ ), manyetik alan vektörü ( $\vec{H}$ ) ve dalga vektörü ( $\vec{k}$ ) bu ortamda sol el kuralına uymaktadır. Bu yüzden bu malzemelere sol el yönlü malzemeler (LHM) denir. Bu yapay malzemeler eş zamanlı olarak negatif etkin dielektrik sabitine ( $\epsilon$ ), negatif manyetik geçirgenliğe ( $\mu$ ) ve negatif kırılma indisine ( $n$ ) sahiptirler.



Şekil 6. Metamalzeme yapısının önden görünüşü

Dielektrik malzeme olarak 38mmx38mm boyutunda dielektrik geçirgenliği 4,3, manyetik geçirgenliği 1, dielektrik kayıp tanjant değeri 0,025 ve kalınlığı 1,6 mm olan FR4-epoxy seçilmiştir. FR4 malzemenin yüzeyi bakır olup kalınlığı 0,035 mm ve elektriksel iletkenliği ise  $5,8001 \times 10^7$  S/m'dir. Tasarlanan MTM yapıları, Şekil 6'da görüldüğü gibi dielektrik yüzey üzerine 2x4

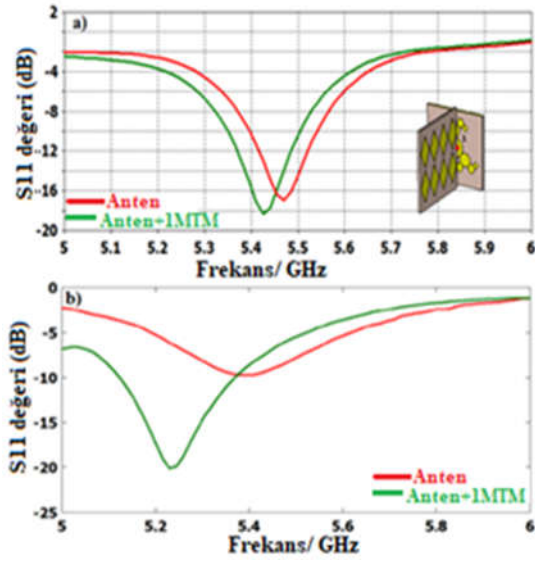
periyodik olarak birbirinin aynısı eşkenar dörtgen yapıların yerleştirilmesiyle oluşmuştur. Her bir eşkenar dörtgenin kenar uzunluğu 8,66 mm'dir.



Şekil 7. Eşkenar dörtgen MTM yapısının reel ve sanal (a) manyetik geçirgenlik, (b) dielektrik geçirgenlik ve (c) kırılma indisi

Tasarlanan MTM yapısının sanal ve reel etkin manyetik geçirgenliği, etkin dielektrik sabiti, kırılma indisinin grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Sol-elli metamalzeme kullanılacak antenin çalışma frekansı 5,47 GHz'dir. MTM yapısının dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi değerleri yaklaşık 3GHz- 5.5GHz arasında eş zamanlı negatif olduğu görülmektedir ve antenin çalışma frekansı bu aralıkta yer almaktadır.

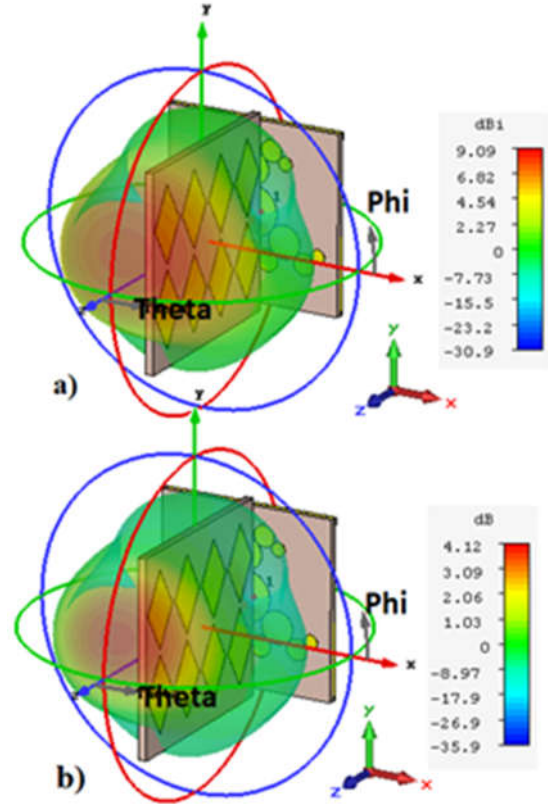
Tasarlanan MTM yapısı fraktal anten üzerine, anten yüzeyine 90 derece olacak şekilde farklı sayılarda ve farklı konumlarda yerleştirilmiş ve her bir konfigürasyon için sayısal ve ölçüm sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 8. Anten ve 1 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

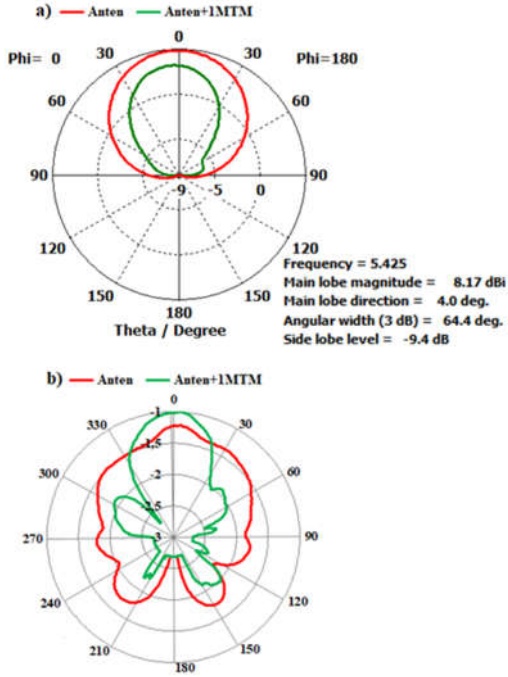
Şekil 8a incelendiğinde, antenin simülasyon sonucunda S11 değeri 5,47 GHz’de yaklaşık olarak -16,97 dB iken, MTM yapısı eklendikten sonra bu değer -18,31 dB’ye düştüğü görülmektedir. Ayrıca, antenin bant genişliği 146 MHz’den 153,5 MHz’e yükselmiştir. Üretimi yapılan anten ve üzerine yerleştirilen 1 MTM yapısının S11 değeri 5,23 GHz’de -20,11 dB olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, yönlülük, verim ve kazancın belirlenmesi için antenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu ışınma örüntüleri önemlidir.

Şekil 9’da anten ve 1 MTM yapısının üç boyutlu yönlülük ve kazanç ışınma eğrileri verilmiştir. Antenin, MTM olmadan yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB iken, 1 MTM eklendikten sonra yönlülüğü 9,09 dBi, kazancı 4,12 dB olmuştur. Böylece, MTM yapısı kullanılarak antenin yönlülüğü ve kazancı artırılmıştır. Ayrıca, anten ve 1MTM yapının tek yönde ışınma yaptığı görülmektedir.

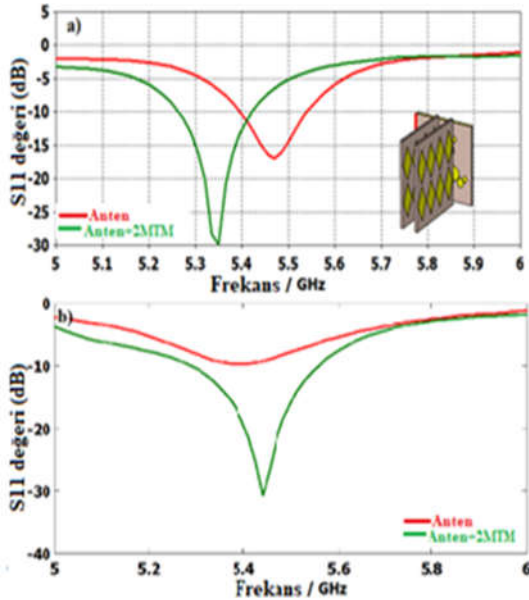


Şekil 9. Anten ve 1MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Şekil 10a’da üzerine 1 MTM yapısı eklenmiş antenin sayısal olarak elde edilmiş 2 boyutlu ışınma eğrisi görülmektedir. Antenin,  $\Phi = 0$  derecede, MTM konulmadan ana loblardaki ışınma büyüklüğü 4,85 dBi, hüzmeye açısı 87,3 derecedir. Anten üzerine 1 MTM yapısı eklendikten sonra, ana lobundaki ışınma büyüklüğü 8,17 dBi, yan lobundaki ışınma büyüklüğü -9,4 dB ve hüzmeye açısı ise 64,4 derece olarak elde edilmiştir. Şekil 10b’de üzerine 1 MTM yapısının yerleştirilmiş antenin ölçülen 2 boyutlu ışınma eğrisi görülmektedir. Şekil 10b incelendiğinde, üzerine 1 MTM yapısının yerleştirilmiş antenin yan loblarının küçüldüğü, ana lob yönünde ışınmanın arttığı ve sonuç olarak MTM yapısının antenin yönlülüğünü ve kazancını arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, sayısal olarak elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

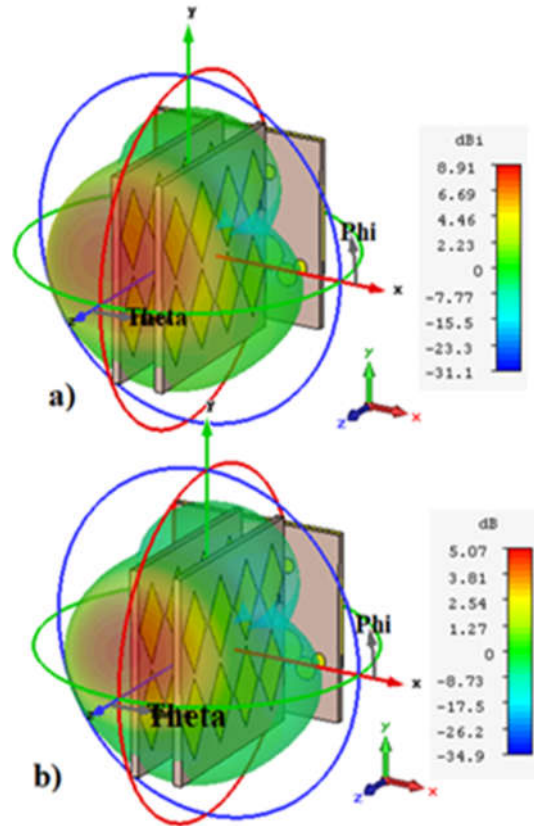


Şekil 10. Anten ve 1MTM yapının 2 boyutlu ışınma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)



Şekil 11. Anten ve 2 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

Anten üzerine 2 MTM yapı Şekil 11a'da görüldüğü gibi yerleştirilerek yansımaya katsayısının (S11) sayısal ve ölçüm grafikleri elde edilmiştir. Anten üzerine yerleştirilen 2 MTM arasındaki mesafe 7,40 mm olarak ayarlanmıştır. Yeni yapının S11 değeri 5,35 GHz'de -29,873 dB'ye düşmüş ve bant genişliği 156,3 MHz olmuştur. Üretimi gerçekleştirilen bu yapının 5,44 GHz'de ölçülen S11 değeri -30,749 dB olarak bulunmuştur.



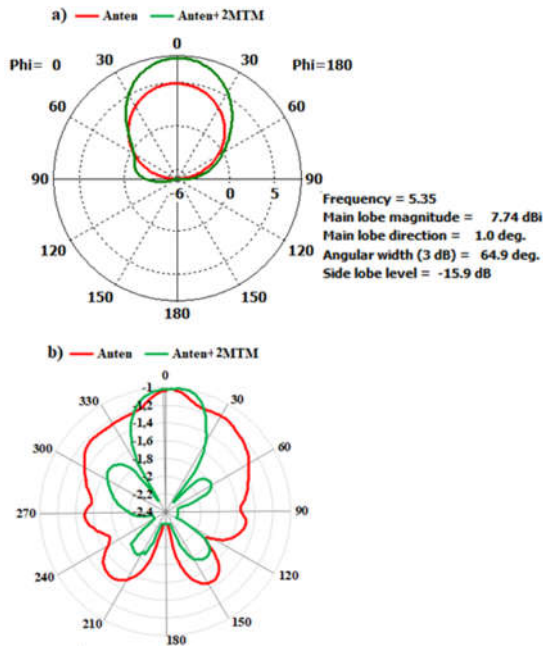
Şekil 12. Anten ve 2 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

MTM olmadan antenin yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB olarak elde edilmişti, ancak antenin üzerine 2 MTM yapısı yerleştirildikten sonra kazancı 5,07 dB, yönlülüğü 8,91 dBi'ye yükselmiştir. 2 MTM yapısı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 12'de



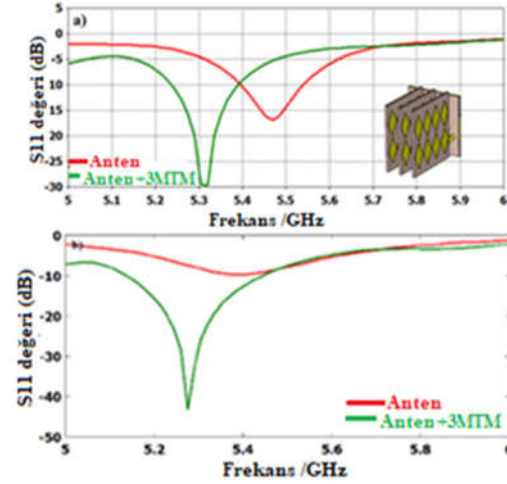
görülmektedir. Şekilde, yayılım beklendiği gibi tek yönde olduğu açıkça görülmektedir.

Üzerine 2MTM yapı eklenmiş antenin, 2 boyutlu ışınım örüntüsü Şekil 13'de verilmiştir. Şekil 13a'da görüldüğü gibi ana lobun ışınım büyüklüğü 7,74 dBi, yan lobun ışınım seviyesi -15,9 dB ve hüzmeye açısı 64,9 derecedir. Diğer taraftan, üretilen bu yapının ölçülen 2 boyutlu ışınım örüntüsü Şekil 13b'de verilmiştir. Anten üzerine yerleştirilen 2 MTM yapının antenin ana lobundaki ışınım büyüklüğünü arttırdığı, yan loblardaki ışınım büyüklüğünü azalttığı, ayrıca antenin yönlülüğünü ve kazancını da arttırdığı görülmektedir.



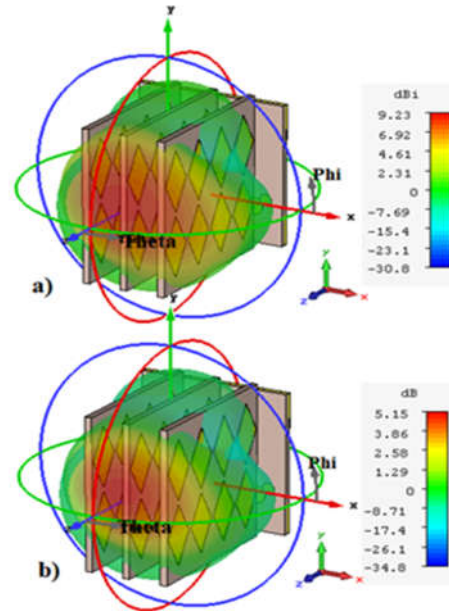
Şekil 13. Anten ve 2 MTM yapının 2 boyutlu ışınım eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

Anten üzerine 7,40 mm aralıkla, 3MTM yapısı yerleştirildiğinde; sayısal olarak elde edilen S11 değeri 5,32 GHz'de -29,57 dB, bant genişliği ise 159,2 MHz olarak Şekil 14'de görülmektedir. Diğer taraftan, üretilen yeni yapının S11 değeri ise 5,275 GHz'de -43,119 dB ölçülmüştür.

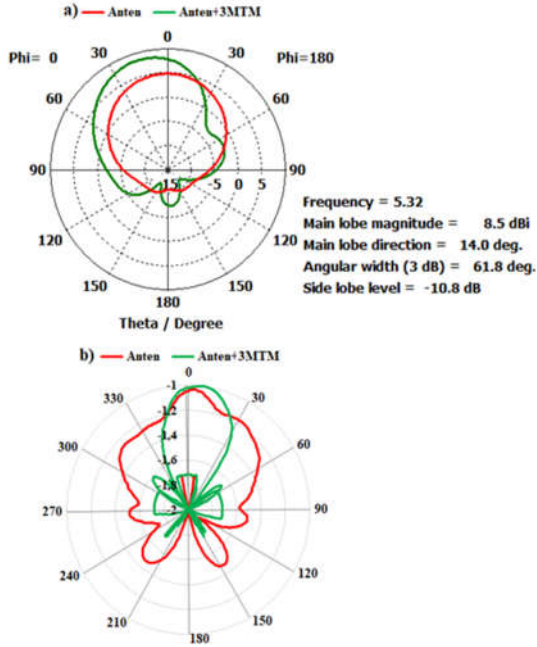


Şekil 14. Anten ve 3 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

Üzerine 3 MTM yapısı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 15'de görülmektedir. MTM olmadan 1,19 dB olan anten kazancı, 3 MTM yapısı yerleştirildikten sonra 5,15 dB'ye, yönlülüğü ise 6,65 dBi'den 9,23 dBi'ye yükselmiştir.



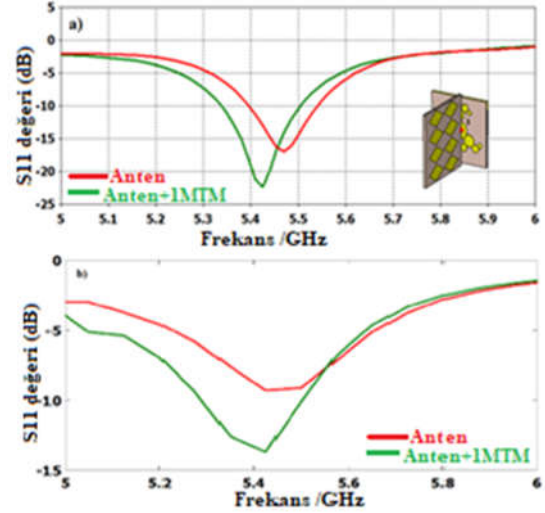
Şekil 15. Anten ve 3 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınım eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç



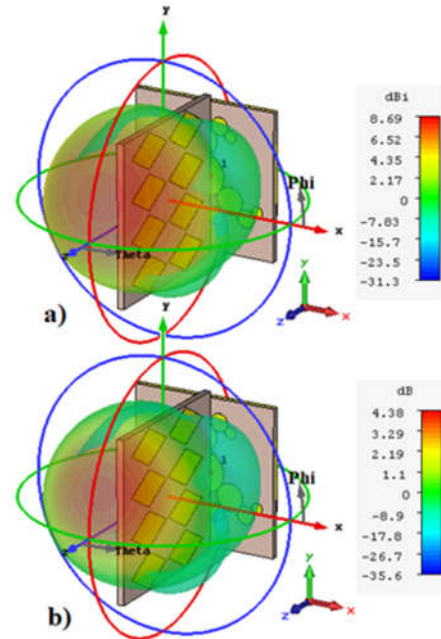
Şekil 16. Anten ve 3 MTM yapının 2 boyutlu ışınma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

Şekil 16’da görüldüğü gibi,  $\Phi=0$  derecede ana lobdaki ışınma büyüklüğü 8,5 dBi, yan lobdaki ışınma -10,8 dB seviyesindedir. Ayrıca, hüzmeye açısı 87,3 dereceden 61,8 dereceye düşmüştür. Ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışınma örüntüsüne bakıldığında hem yönlülüğün, hem de kazancın önemli ölçüde arttırdığı ve ışınımın tek yönde olduğu görülmektedir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, üretim ve simülasyon sonuçları uyum içerisindedir.

Bu bölümde, anten üzerine yerleştirilen MTM yapısı, anten yüzeyine dik konumda kalacak şekilde 90 derece çevrilerek simülasyon ve ölçümler tekrarlanmıştır. MTM yapı Şekil 8’de verilen yapıya göre 90 derece döndürüldüğünde; 5,425 GHz’de yansıma katsayısının (S11) sayısal ve ölçüm değerleri sırasıyla -22,376 ve -13,678 olarak elde edilmiştir. Şekil 17’de, MTM yapının etkisiyle S11 değerinin önemli ölçüde azaldığı ve bant genişliğinin ise yaklaşık olarak 167,4 MHz olduğu görülmektedir.



Şekil 17. Anten ve 1 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

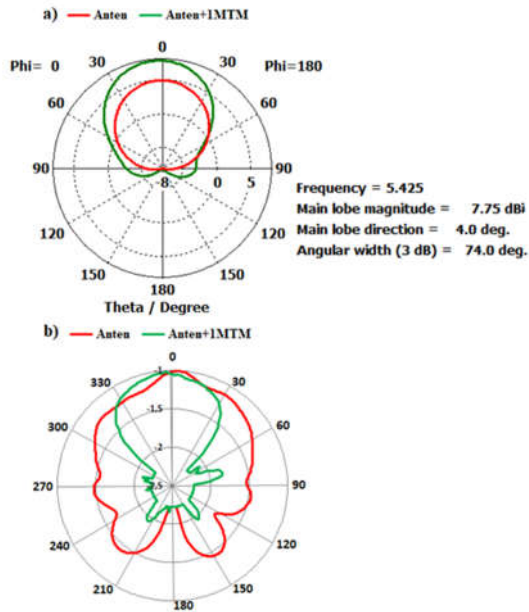


Şekil 18. Anten ve 1MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Şekil 18, üzerine 1 MTM yapısı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiğini göstermektedir. Görüldüğü gibi, üzerinde MTM

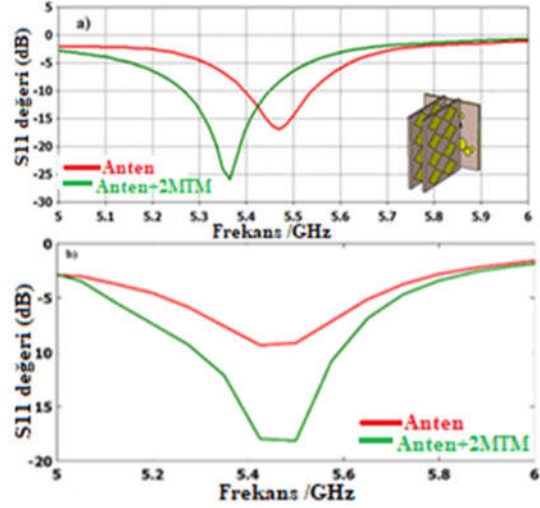
olmadan 1,19 dB olan anten kazancı, MTM yapısı yerleştirildikten sonra 4,38 dB'ye, yönlülüğü ise 6,65 dBi'den 8,69 dBi'ye çıkmıştır.

Üzerine MTM yerleştirilmiş fraktal antenin simülasyon ve ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışınma eğrisi Şekil 19'da verilmiştir. Simülasyon sonucuna göre,  $\Phi=0$  derecede ana lobdaki ışınma büyüklüğü 7,75 dB, hüzmeye açısı ise 74,0 derecedir ve yan loblarda ışınma görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, MTM yapının antenin yan loblarını azalttığı ve ana lobundaki ışınmayı arttırdığı görülmektedir. Ayrıca, MTM yapının antenin yönlülüğünü ve kazancını da arttırdığı görülmektedir.

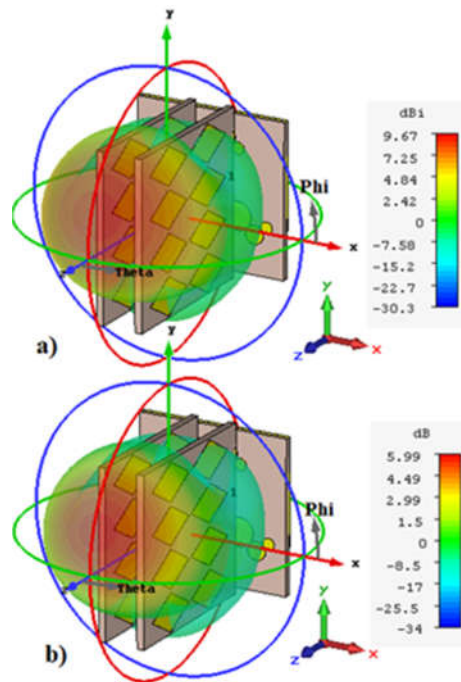


Şekil 19. Anten ve 1 MTM yapının 2 boyutlu ışınma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

2 adet MTM yapı anten üzerine Şekil 20'de görüldüğü gibi yerleştirildiğinde; Simülasyon sonuçlarına göre, 5,365 GHz'de S11 değeri -25,908 dB'ye düşmüş ve bant genişliği 183,5 MHz olarak gerçekleşmiştir. Üretilen yeni yapının ölçülen S11 değeri ise 5,5 GHz'de -18,134 dB olmuştur.



Şekil 20. Anten ve 2 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

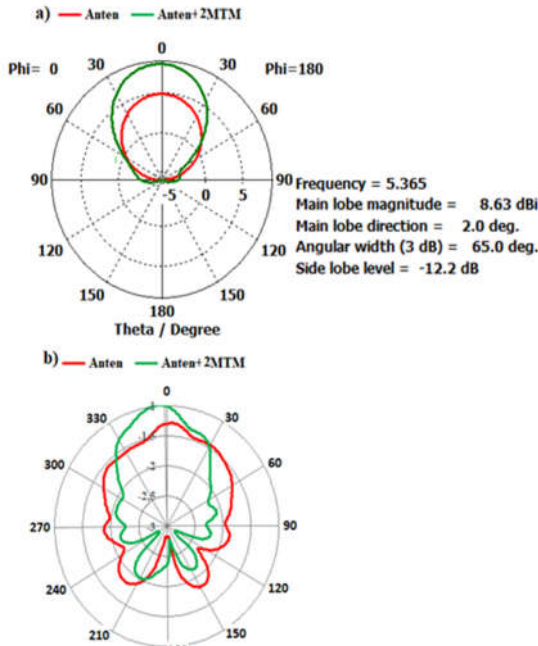


Şekil 21. Anten ve 2 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışınma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Üzerine 2 adet MTM yapı yerleştirilmiş antenin üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 21'de görülmektedir. MTM olmadan 1,19 dB olan anten

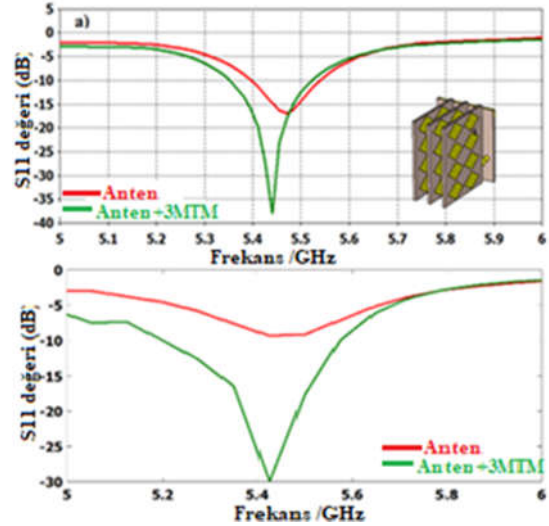
kazancı, 2 adet MTM yapı yerleştirildikten sonra 5,99 dB'ye, yönlülük ise 9,67 dBi'ye yükselmiştir ve ışıma beklendiği gibi tek yönde olmuştur.

Fraktal anten ve üzerine yerleştirilmiş 2 MTM yapının etkileşimi neticesinde elde edilen 2 boyutlu ışıma eğrisinin sayısal ve ölçüm sonuçları Şekil 22'de verilmiştir. Şekil 22 incelendiğinde, Phi=0 derecede, MTM olmadan 4,85 dBi olan ana lobun ışıma büyüklüğü, 2 adet MTM yapı yerleştirildikten sonra 8,63 dBi'ye yükseldiği, yan lobundaki ışıma miktarının ise -12,2 dB olduğu görülmektedir. Ayrıca, hüzmeye açısı 87,3 dereceden 65,0 dereceye düşmüştür.



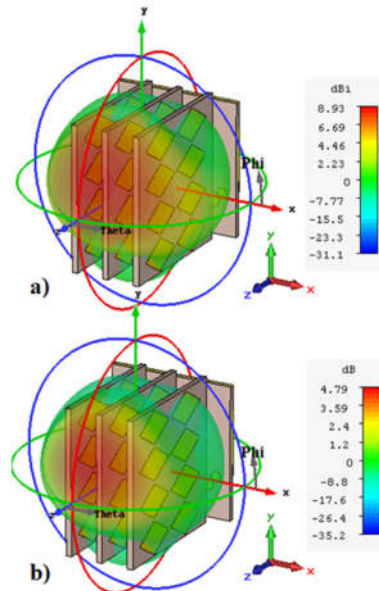
Şekil 22. Anten ve 2 MTM yapının 2 boyutlu ışıma eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

Üç adet MTM yapı yerleştirilmiş anten için yansıma katsayısı (S11) Şekil 23'de verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, 5,44 GHz'de S11 değeri -38,024 dB'ye düşmüş ve bant genişliği 172 MHz olarak gerçekleşmiştir. Üretilen yeni yapının ölçülen S11 değeri ise 5,425 GHz'de -29,923 dB olarak gerçekleşmiştir.



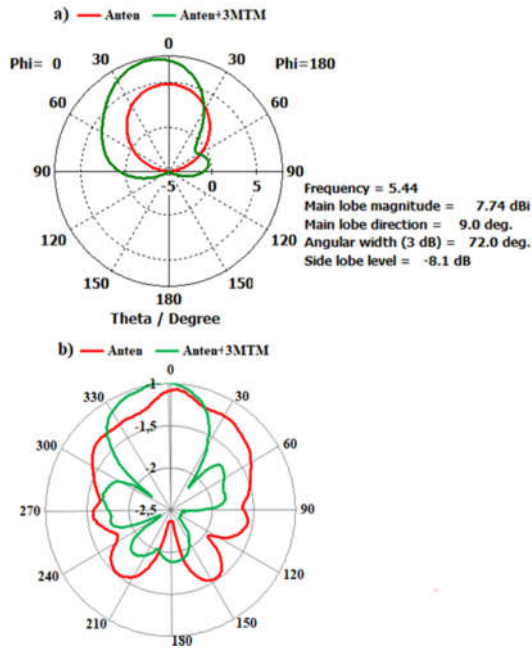
Şekil 23. Anten ve 3 MTM yapının S11 grafiği (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu

Bu yeni konfigürasyonun üç boyutlu yönlülük ve kazanç grafiği Şekil 24'de görülmektedir. Şekil 24 incelendiğinde, MTM yapıları eklenerek antenin kazancı 1,19 dB'den 4,79 dB'ye yönlülüğü 6,65 dBi'den 8,93 dBi'ye yükselmiştir.



Şekil 24. Anten ve 3 MTM yapının üç boyutlu (3D) ışıma eğrisi; (a) yönlülük, (b) kazanç

Fraktal anten ve MTM yapının sayısal ve ölçüm sonucunda elde edilen 2 boyutlu ışımaya eğrisi Şekil 25’de görülmektedir. Şekil 25’de görüldüğü gibi,  $\Phi=0$  derecede ana lobdaki ışımaya büyüklüğü 7,74 dBi, yan lobdaki ışımaya -8,1 dB seviyesinde ve hüzme açısı ise 72 derecedir. Ölçüm sonuçları incelendiğinde, MTM yapısının antenin yan loblarını azalttığı ve ana lobundaki ışımayı arttırdığı anlaşılmaktadır.










Şekil 25. Anten ve 3 MTM yapının 2 boyutlu ışımaya eğrisi (a) simülasyon sonucu (b) ölçüm sonucu (normalize)

#### 4. SONUÇ

5,47 GHz’de çalışan 35 mm x 35 mm boyutlarında dairesel şekillerden oluşmuş bir fraktal anten tasarlanmıştır. MTM yapısı ise 38 mm x 38 mm boyutunda 2x4 periyodik olarak sıralanmış eşkenar dörtgenlerden oluşmaktadır. MTM yapılar anten üzerine 90 derece gelecek şekilde, farklı sayıda yerleştirilmiş ve analiz edilmiştir. Simülasyonu ve ölçümü yapılan konfigürasyonların hem yansımaya katsayısı (S11), hem de ışımaya örüntüleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada incelenen konfigürasyonların özet sonuçları

Çizelge 2’de listelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, MTM olmadan antenin yansımaya katsayısı, S11 değeri 5,47 GHz’de -16,947 dB, yönlülüğü 6,65 dBi, kazancı 1,19 dB, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü 4,85 dBi olarak elde edilmiştir. 2 MTM yapı anten üzerine yerleştirildiğinde, simülasyon sonucunda elde edilen S11 değeri 5,365 GHz’de -25,908 dB, yönlülüğü 9,67 dBi, kazancı 5,99 dB, ana lobundaki ışımaya büyüklüğü 8,63 dBi, bant genişliği 183,5 MHz’e yükselmiştir. Hüzme açısı ise 65 derecedir. Üretimi gerçekleştirilen Anten +2MTM yapısının S11 değeri ise 5,5 GHz’de -18,134 dB’ye düşmüştür. MTM yapıları eklendikten sonra rezonans frekansında meydana gelen kaymalar, MTM yapı ile anten arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 2. Özet simülasyon sonuçları

ANTEN				
Görünüş	Frekans	Geri dönüş kaybı	Kazanç	Directivity
	5.47 GHz	-16.947 dB	1.19 dB	6.65 dBi
Üzerinde bir katman MTM bulunan fraktal anten parametreleri				
	5.425 GHz	-18.311 dB	4.12 dB	9.09 dBi
	5.425 GHz	-22.376 dB	4.38 dB	8.69 dBi
Üzerinde iki katman MTM bulunan fraktal anten parametreleri				
	5.35 GHz	-29.873 dB	5.07 dB	8.91 dBi
	5.365 GHz	-25.908 dB	5.99 dB	9.67 dBi
Üzerinde üç katman MTM bulunan fraktal anten parametreleri				
	5.32 GHz	-29.576 dB	5.15 dB	9.23 dBi
	5.44 GHz	-38.024 dB	4.79 dB	8.93 dBi

Ölçüm ve simülasyon sonuçları uyum içerisindedir. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen yapının antenin yönlülüğünü, kazancını ve verimliliğini arttırdığı anlaşılmaktadır. Ölçüm ve

simülasyon sonuçları arasında gözlenen farklılıklar üretim ve ölçüm hatalarından kaynaklanmaktadır.

Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 400-402.

## **5. KAYNAKLAR**

1. Çelik, K., Kurt, E., 2018. Design and Simulation of the Antenna for RF Energy Harvesting Systems. 6<sup>th</sup> International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), 148-150.
2. Hirway, H., Shaikh, T., 2018. Comparison of Low Profile Sierpinski and Koch Fractal Antenna for Wireless Application. Proceeding of 2018 IEEE Int. Conference on Current Trends Toward Converging Technologies, Coimbatore, India, 1-6.
3. Mete, C., 2011. Minkowski Fraktal Anten Tasarımı ve Yapay Sinir Ağı Modeli. Yıldız Teknik Üniversitesi, FBE, Yüksek Lisans Tezi, s75, İstanbul.
4. Jena, M., Mangaraj, B., Mishra, D., 2013. Bandwidth and Gain Enhancement of Multiband Fractal Antenna Based on the Sierpinski Carpet Geometry. ICTACT Journal on Communication Tech., 669-674.
5. Sivia, J., Bhatia, S., 2015. Design of Fractal Based Microstrip Rectangular Patch Antenna for Multiband Applications. 2015 IEEE Int. Advance Computing Conference (IACC), 712-715.
6. Gupta, M., Mathur, V., 2018. Hexagonal Fractal Antenna Using Koch for Wireless Applications, Frequenz 2018, 443-453.
7. Safia, O., Eleftheriades, G., 2018. A New Gosper Island Fractal UWB Monopole Antenna with Enhanced Bandwidth Characteristics. IEEE Int. Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 1043-1044.
8. Madhav, B., Reddy, V., Rajasekar Reddy, D., Sankar, K., Ramanujan, E., Prakash, V., Rao, M., 2018. Tree Shaped Fractal Antenna with Multiband Characteristics. International Journal of Engineering and Technology, 333-338.
9. Yong, W., Shaobin, L., 2008. A New Modified Crown Square Fractal Antenna. In 2008 Int.

## Tasnif Edilmiş İnşaat Yıkıntı Atıklarından Elde Edilen Harman Tuğlası, Delikli Tuğla ve Çatı Kiremitinden Oluşan İkili Karışımların Geopolimer Hamur Üretiminde Değerlendirilmesi

Raci BAYER<sup>1</sup>, Hüseyin ULUGÖL<sup>\*2</sup>, İlhami DEMİR<sup>3</sup>, Gürkan YILDIRIM<sup>3</sup>,  
Mustafa ŞAHMARAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara

<sup>2</sup>Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

<sup>3</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale

Geliş tarihi: 24.10.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Çimento endüstrisinin yüksek CO<sub>2</sub> salımı, enerji ve doğal kaynak tüketimi gibi sebeplerden dolayı araştırmacılar alternatif bağlayıcı malzeme arayışına girmişlerdir. Alkali-aktif malzemeler ve geopolimer bu alternatif bağlayıcı malzemeler içerisinde son zamanlarda oldukça popülerdir. Söz konusu çalışma kapsamında tasnif edilmiş inşaat yıkıntı atıkları (İYA) 10 ve 15 M NaOH çözeltileri ile aktive edilerek geopolimer hamurlar üretilmiştir. Aktive edilen inşaat yıkıntı atıkları çatı kiremiti, delikli ve harman tuğlanın ayrı ayrı %75 ya da %25 oranlarında kullanıldığı ikili karışımlardır. İkili karışımlarla elde edilecek iyi sonuçlar hem üçlü karışımların kullanımını cesaretlendirecek hem de yıkıntı atıklarının, içerisindeki malzeme oranlarına göre optimum aktivatör ve kür koşullarıyla, tasnif edilmesine gerek kalmadan karışık şekilde kullanımının önünü açacaktır. Hamurların 24, 48 ve 72 saat süreyle 95, 105, 115 ve 125 °C sıcaklıklarda kür edildiği bu çalışmada, en yüksek basınç dayanım değeri 83,1 MPa değeriyle 72 saat 115 °C'de kür edilen %75 delikli tuğla ve %25 harman tuğlasından oluşan numuneden elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alkali-aktif malzemeler, Geopolimer, İnşaat yıkıntı atıkları, Yüksek sıcaklık kürü, NaOH

### Assessment of Clay Brick, Hollow Brick and Roof Tile Provided from Assorted Construction and Demolition Waste in Geopolymerization

#### Abstract

Researchers are in search of a new binding material because of the high CO<sub>2</sub> emissions and consuming natural resources of cement industry. Alkali-activated materials and geopolymer are very popular recently. In this study, assorted construction and demolition wastes (CDW) were activated with 10 and 15 M NaOH solutions. CDW were used as binary combinations of roof tile, hollow brick and clay brick with percentages of 25% and 75% separately. Thus, both triple mix designs would be possible and not assorted CDW will be able to used through their own optimum activator and curing conditions. Specimens were

\* Sorumlu yazar (Corresponding author): Hüseyin ULUGÖL, [hu.ulugol@gmail.com](mailto:hu.ulugol@gmail.com)

cured at 95, 105, 115, 125 °C for 24, 48, 72 h and maximum compressive strength result was obtained by alkali-activation of 75% hollow brick and 25% clay brick mix cured at 115 °C for 72 h.

**Keywords:** Alkali-activated materials, Geopolymer, Construction and demolition waste, High temperature curing, NaOH

## 1. GİRİŞ

Çimento endüstrisi önemli sera gazlarından birisi olan karbondioksitin atmosfere salımında tüm dünyada %5'lik, enerji tüketiminde ise %2'lik bir paya sahiptir [1]. Ayrıca çimento endüstrisinin başlıca hammaddesi olan kalker ve kilin birer doğal kaynak oldukları göz önüne alınınca çimento endüstrisinin yalnızca karbon salımına sebep olmakla kalmayıp aynı zamanda doğal kaynakları da tükettiği görülmektedir. Giderek artan beton kullanım oranına paralel olarak çimentoya olan talebin de artışı çimento üretiminin bu zararlı etkilerini daha da öne çıkarmaktadır. Öyle ki tüm dünyada beton üretimi son 60 yılda 12 kat artmıştır ve günümüzde kişi başı yılda ortalama olarak 1 ton beton üretimi gerçekleşmektedir [2].

Çimento endüstrisinde klinker üretiminin enerji tüketiminden ve karbondioksit salımından dolayı, aynı zamanda alternatif hammaddelerin de değerlendirilmesi düşüncesiyle zaman içerisinde katkılı çimentoların kullanım oranı artmıştır. Katkılı çimentolar bünyelerinde daha az klinker ihtiva ettiği için klinker talebini doğrudan azaltan bir yöntemdir [3]. Ayrıca beton üretimi sırasında mineral katkıları çimentoyla ikame ederek de portland çimentosuna dolayısıyla klinkere olan talebi azaltmak mümkündür. Dutta ve Maity [4] [5] yapmış oldukları çalışmada kalker taşıma çimento içerisinde klinkerle ikame ederek kullanmışlar, bu malzemenin belli oranlara kadar kullanılabilirliğini ve çimento üretimi sırasında karbondioksit salımının azaltılabileceğini ve enerji ihtiyacının azalacağını göstermişlerdir. Klinker kullanımını azaltmak ve doğal kaynakları korumak için bir diğer yöntem ise ayrıştırılmış inşaat yıkıntı atıklarının çimento üretiminde tamamlayıcı malzeme olarak ya da doğal kaynakları korumak adına çimento klinkeri hammaddesi olarak kullanılmasıdır. Yapılan bir çalışmada atık betondan ayrıştırılmış çimento hamurunun ince

fraksiyonları yüksek CaO içeriği sayesinde klinker hammaddesi olarak kullanılırken [6], bu gibi yöntemlerde betonu hamur ve agrega olarak ayırmak çaba gerektirmektedir. Başka bir çalışmada seramik atığının beton içerisinde %20'ye kadar çimento ile ikame edilebileceği gösterilmiştir [7]. Bununla birlikte katkılı çimento kullanımı klinkere olan talebi tamamen ortadan kaldırmamakta ancak kullanım miktarını azaltmaktadır.

Bu durum araştırmacıları çimentoya alternatif olabilecek bağlayıcı malzemeler geliştirmeye yönlendirmektedir. Bu alternatif malzemelerden birisi de son zamanlarda popüleritesi oldukça artmış olan geopolimer bağlayıcılarıdır. Geopolimer toz haldeki hammaddenin alkali-hidroksit, alkali-silikat ya da her ikisinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan kimyasal aktivatör ile aktivasyonu sonucunda oluşan, katı ve kararlı alüminosilikat malzeme olarak tanımlanmaktadır [8]. Geopolimer bağlayıcılar alkali-aktif malzemelerin düşük CaO içerikli bir alt sınıfıdır. Yüksek CaO içeriğine sahip alkali-aktif sistemlerde reaksiyon ürünü çimentonun hidrasyon ürününe benzeyen, çimento notasyonunda gösterimi C-A-S-H ile verilen kalsiyum alüminosilikat hidrat şeklinde oluşmaktadır. Bu çalışmanın da konusu olan geopolimerlerin CaO içeriği düşük olduğu için reaksiyon ürünleri N-A-S-H ile verilen, yüksek CaO içeren sistemlerdeki kalsiyum oksidin alkali oksit ile yer değiştirdiği ve alkali alüminosilikat hidrat şeklinde ifade edilen bileşiktir. Burada N alkali oksidi ifade etmektedir.

Geopolimer ilk kez 1970'li yıllarda ateşe dayanıklı malzeme arayışıyla ortaya çıkmıştır [8]. Uçucu külün alkalilerle aktive edilmesiyle elde edilen geopolimer malzemenin güvenilir kararlı bir bağlayıcı olabileceği fark edildikten sonra [9] farklı aktivatörlerle farklı sıcaklıklarda aktive edildiği [10] çalışmalar da yapılmıştır. Sonrasında



ise kaolin ve metakaolin gibi yüksek reaktiviteye sahip malzemelerle birlikte kullanılan uçucu kül [11, 12] geopolimer üretimi konusunda rüştünü ispatlamıştır.

Uçucu küle birlikte alkali aktivasyonu için bir diğer popüler hammadde yüksek fırın cürufudur. Yüksek CaO içeriğiyle alkali-aktive yüksek fırın cürufu geopolimer sınıfında olmamakla birlikte literatürde pek çok alkali-aktive edilmiş cürufu bağlayıcılar geopolimer ismiyle anılmaktadır. Yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktive edildiği bir çalışmada kalsiyum içeren alüminosilikatların diğer alkalileri içerenlere göre daha az kararlı olduğu görülmüştür [13]. Bununla birlikte kalsiyumlu sistemlerde geçirgenliğin az olduğu ve bunun sonucunda dayanıklılığının yüksek olduğu da söylenmektedir [14]. Yüksek miktarda kalsiyum içeren sistemlerin geçirgenliğinin az oluşu bu sistemlerde oluşan C-S-H benzeri amorf koloidal mikro boşluklu yapıdan kaynaklanmaktadır [15]. Yüksek kalsiyumlu alkali-aktive edilmiş bağlayıcıların hidrasyon ürünü çimentonun hidrasyon ürünü olan tobermorite benzediği söylenmekle birlikte, yine de bu sistemlerdeki kalsiyum içeriği çimentolu sistemlerdeki kadar yüksek değildir [16]. Alkali-aktivasyonu için uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi çimento endüstrisinde mineral katkı olarak kullanılan malzemelerin yanı sıra kimyasal bileşimleri bu mineral katkılara benzeyen, benzer kristal yapıdaki, belirli reaktiviteye sahip malzemelerin kullanımı da mümkündür. Kentsel dönüşüm gibi uygulamalardan elde edilen inşaat yıkıntı atıklarının (İYA) geopolimerizasyon için kullanılabilmesi yapılan bazı çalışmalarda görülmüştür. Özellikle geopolimerizasyonun önemli motivasyon kaynaklarından birisi olan sürdürülebilirlik ve çevresel fayda göz önüne alınca İYA kullanımı daha da önem kazanmaktadır. Avrupa Birliği ülkelerinde yıllık yaklaşık 450 milyon ton atık ortaya çıkmakta bu atığın 180 milyon tonu İYA olmaktadır. Massachusetts Halk Sağlığı Birimine göre Amerika'da ise evsel olmayan katı atıkların %95'i İYA'dır. İYA için atık depolama alanlarına ihtiyaç

bulunmaktadır bununla birlikte bazı uygulamalarda atıkların kaçak şekilde döküldüğü de bilinmektedir ve her iki durum hem çevresel zarara hem de ekonomik kayba yol açmaktadır. Bu durum göz önüne alınca İYA'ların alkali-aktivasyonunda değerlendirilmesi araştırmacılara motivasyon sağlamaktadır. İYA'nın alkali-aktivasyonu için kullanımında ilk önceleri hali hazırda kullanılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi malzemelerle ikame şeklinde gerçekleştirilmiştir. Cristelo ve arkadaşları [17] sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeren alkali-aktive uçucu külün içerisine ayrıştırılmamış durumdaki İYA'yı belirli sınırlar dahilinde ekleyerek İYA içerisindeki betonun CaO içermesi sayesinde N-A-S-H yanı sıra C-A-S-H reaksiyon ürünü elde edebileceğini göstermiştir. Başka bir çalışmada tuğla atığı, beton atığı ve cam atığı ayrı ayrı NaOH ile aktive edilerek 25 ve 70 °C'de kür edilmiş ve 10 MPa üzerinde dayanım sonuçları elde edilmiş ayrıca kür sıcaklığındaki artışın özellikle kristal yapıya sahip hammaddelerden üretilen geopolimerlerin mekanik özelliklerini arttırdığı görülmüştür [18].

Atık malzemelerin geopolimerizasyonunda tuğla atıkları oldukça popülerken [19-22] cam atığının [23, 24] ve beton atığının da [25, 26] tek başlarına kullanılarak mekanik özelliklerinin ve dayanıklılık performansının değerlendirildiği çalışmalar mevcuttur. Ancak İYA'ların tek başlarına kullanılabilmesi için ya yıkımı yapan yüklenici firma tarafından yıkım süreci içerisinde ya da geopolimerin üretim aşamasında ayrıştırılması gerekmektedir ve bu durum süreci zorlaştırmaktadır. Ancak İYA'ların belirli oranlarla yer aldığı ikili hatta üçlü birleşimleriyle alkali-aktivasyonun gerçekleştirilmesi ve farklı malzeme oranlarına göre optimum aktivatör tipinin ve kür koşullarının tespit edilmesi, zaman içerisinde İYA'ların alkali-aktivasyonunda ayrıştırılmadan kullanılabilmesinin de önünü açacaktır. Bu çalışma kapsamında harman tuğlası, delikli tuğla ve çatı kiremitinin ayrı ayrı %25 ve %75 oranlarında yer aldığı ikili karışımlar NaOH ile aktive edilerek hem çeşitli tuğla türlerinin birlikte kullanılabilirliği hem de ikili karışımlar için optimum aktivatör konsantrasyonu, kür sıcaklığı ve süresi tespit edilmeye çalışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

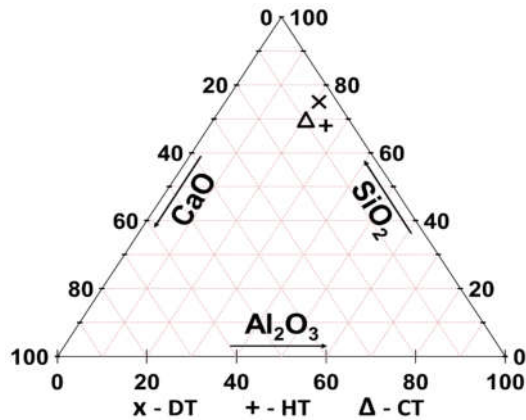
Çalışma kapsamında Ankara’da bir yıkım bölgesinden tasnif edilmiş harman tuğlası (HT), delikli tuğla (DT) ve çatı kiremiti (CK) temin edilmiş ve laboratuvar tipi kırıcıyla kırılmıştır. Sonrasında çeşitli sürelerde öğütme işlemi

yapılarak tuğla ve kiremit atıklarının (TKA) laboratuvar tipi bilyalı öğütücüye göre optimum öğütme süresi 2 saat olarak tespit edilip, bu sürelerde tüm malzemeler için öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin kimyasal içerikleri ve CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> üçlü diyagramındaki konumları sırasıyla Çizelge 1 ve Şekil 1’de görüldüğü gibidir.

Çizelge 1. TKA kimyasal bileşimleri (%)

İYA Türü	KK*	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
DT	1,99	61,61	17,27	6,70	3,31	2,66	0,38	1,61	2,80
HT	2,18	53,39	20,50	7,77	4,75	3,70	1,16	1,53	3,42
CK	2,11	54,02	15,98	8,93	7,42	4,84	0,68	1,41	2,30

\*KK : Kızdırma Kaybı

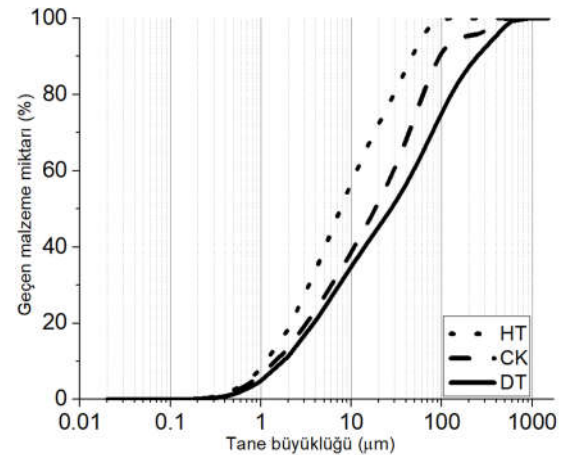


Şekil 1. Malzemelerin üçlü diyagramdaki yerleri

Her üç atık da yeterli miktarda SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine sahiptir ve bu değerler çok iyi bir geopolimerizasyon hammaddesi olduğu bilinen uçucu küle oldukça benzerdir [27, 28]. Öğütülen malzemelerin tane dağılımları ise Şekil 2’de görülmektedir. Eşit sürede öğütülen malzemeler içerisinde HT, daha yumuşak oluşu dolayısıyla diğerlerinden biraz daha fazla incelmıştır. HT’nin yaklaşık tamamı, CK’nin %95’i, DT’nin ise %80’i 100 µm altındadır.

Kimyasal aktivatör olarak 10 ve 15 M NaOH çözeltileri kullanılmıştır. Ayrıca TKA’nın geopolimerik reaktivitesini görmek amacıyla her

üç malzemeden 20’şer gr numune 10 M NaOH çözeltilisi içerisinde çözünmesi için 24 saat bekletildikten sonra 24 saatin sonunda çözelti ile çökelti ayrıştırılıp çözelti seyreltilmiş ve bu çözelti üzerinde ICP-OES analizi yapılmıştır. Buna göre HT, CK ve DT için Al iyonu değerleri sırasıyla 1363, 230 ve 293 mg/L, Si iyonu değerleri ise 424, 647 ve 576 mg/L olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2. Malzemelerin tane dağılımları

### 2.2. Deneysel Çalışma

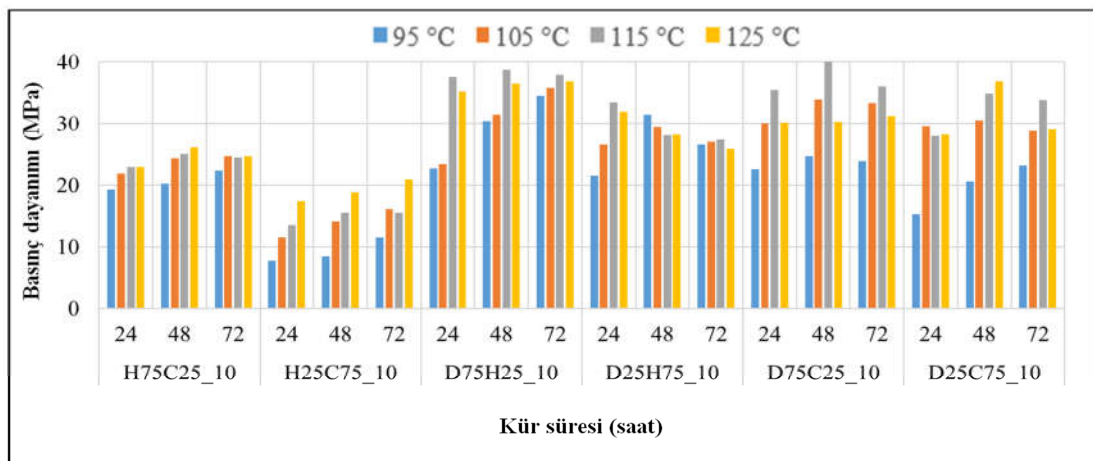
Yapılan ön çalışmalarda, NaOH suda çözülmeden kiremit ve tuğlalardan oluşan toz karışıma ilave edilerek üretim gerçekleştirildiği zaman, su ile toz haldeki NaOH arasında gerçekleşen reaksiyonlar

sonucu ortaya çıkan yüksek ısı alkali-aktivasyonunu çok hızlandırarak hamurun kalıba yerleştirilirken bile sertleşmesine sebep olduğu görülmüştür. Dolayısıyla NaOH 10 M ve 15 M olacak şekilde önceden çözülmüş ve 24 saat soğutulduktan sonra karışıma eklenmiştir. Hamurlar su/bağlayıcı oranı 0.35 olacak şekilde hazırlandıktan sonra 5 cm. küp kalıplara döküm yapılmıştır. Bir gün sonra kalıptan çıkan numuneler 24, 48 ve 72 saat 95, 105, 115 ve 125 °C sıcaklıklarda kür edilmiştir. Kürün hemen ardından numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir. Hamurların isimlendirilmesi yapılırken atık malzemelerin isimlerinin ilk harfinden sonra karışım içindeki yüzde oranı verilmiş, en son olarak da NaOH molaritesi belirtilmiştir. Örneğin H75C25\_10 numune ismi %75 HT ve %25 CK karışımını göstermekte olup bu karışım 10 M NaOH ile aktive edilmiştir.

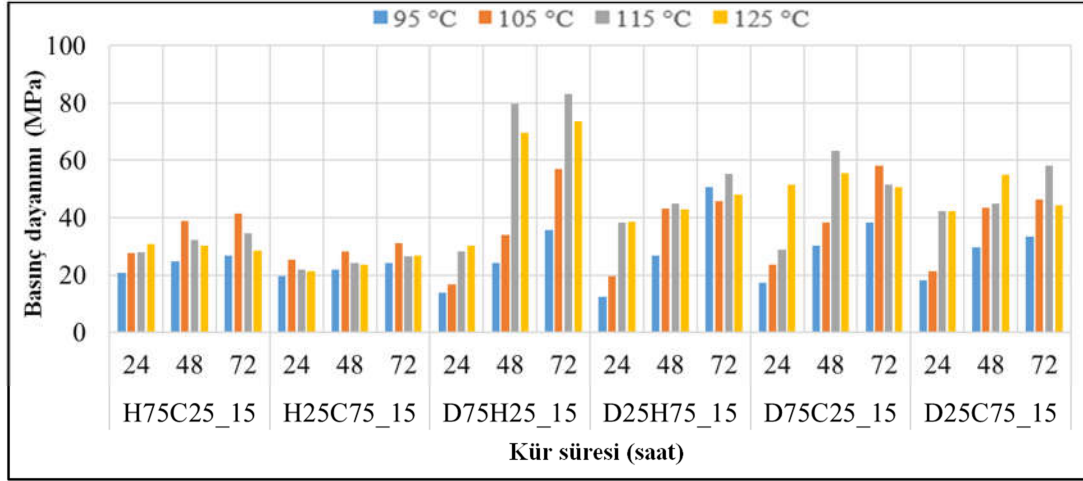
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 3 ve Şekil 4'te sırasıyla 10 ve 15 M NaOH ile aktive edilen hamurların basınç dayanımı sonuçları görülmektedir. 10 M NaOH ile aktive edilen numuneler incelendiği zaman %75 HT ve %25 CK içeren numuneler ne sıcaklık ve kür süresi olursa olsun minimum 19,3 maksimum 26,1 MPa basınç dayanımı değerleri vermiştir. Oranların %25 HT ve %75 CK olması durumunda ise minimum dayanım sonucu 95 °C sıcaklıkta

24 saat kür uygulanan numunede görülmüş olup, 7,8 MPa olan bu değer sıcaklığın ve kür süresinin artmasıyla beraber çok azar azar artarak maksimum 20,9 MPa değerine 125 °C sıcaklıkta 72 saat kür ile ulaşabilmiştir. Bu durumun başlıca sebeplerinden birisi harman tuğlasının çatı kiremitinden çok daha yüksek Al çözünürlüğüne sahip olmasıdır. Al miktarı ve Al iyonlarının serbest hale geçiş hızları geopolimer dayanımı, priz süreleri, asit dayanıklılığı gibi pek çok parametreyi doğrudan etkilemektedir [29]. Si çözünürlüğü açısından çatı kiremiti daha etkili olsa da harman tuğlasının daha reaktif davrandığı görülmüştür. 10 M NaOH ile aktive edilen DT ve HT içeren numunelerde D75H25\_10 numuneleri özellikle 115 ve 125 °C'de D25H75 numunelerine göre biraz daha yüksek dayanım sonuçları vermiştir. En belirgin farklar 115 °C için elde edilmiş olup bu sıcaklıkta D75H25\_10 numuneleri 24, 48 ve 72 saatte sırasıyla 37,6, 38,8 ve 37,9 MPa değerleri verirken D25H75\_10 ise sırasıyla 33,5, 28,1 ve 27,4 MPa dayanım değerleri vermiştir. D75C25\_10 ve D25C75\_10 numunelerine baktığımız zaman da dayanım değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Sırasıyla her iki numune için maksimum dayanım değerleri 115 ve 125 °C sıcaklıklarda ve 48 saat kürde elde edilmiştir ve bu değerler sırasıyla 40,1 ve 36,9 MPa olarak görülmektedir.



Şekil 3. 10 M NaOH ile aktive edilen hamurların basınç dayanımları



Şekil 4. 15 M NaOH ile aktive edilen hamurların basınç dayanımları

15 M NaOH ile aktive edilen hamurlara bakıldığı zaman harman tuğlasının çatı kiremitinden daha reaktif olduğu 10 M NaOH ile aktive edilen numunelerde olduğu gibi burada da görülmektedir. H75C25\_15 ve H25C75\_15 numuneleri için maksimum dayanım değerleri 105 °C sıcaklıkta ve 72 saatte elde edilmiş olup sırasıyla 41,5 ve 31,0 MPa'dır. D75H25\_15 ve D25H75\_15 numuneleri 72 saat 115 °C sıcaklıkta kür sonucunda sırasıyla 83,1 ve 55,3 MPa dayanım değerleri vermiştir. İki numune arasındaki büyük fark 10 M aktivatör kullanılan numunelerde de görüleceği üzere delikli tuğlanın harman tuğlasından daha reaktif oluşundan kaynaklanmaktadır. D75C25\_15 ve D25C75\_15 numunelerinde ise aynı koşullar altında elde edilen maksimum basınç dayanımı değerleri değişebilse de çoğunlukla delikli tuğlanın %75 oranında kullanıldığı numuneler daha yüksek değerler vermektedir. Maksimum basınç dayanımı değerleri D75C25\_15 için 115 °C'de 48 saat kür ile elde edilen 63,3 MPa iken D25C75\_15 numunesi aynı sıcaklık altında ve 72 saat kür ile 58,2 MPa basınç dayanımı değeri vermiştir.

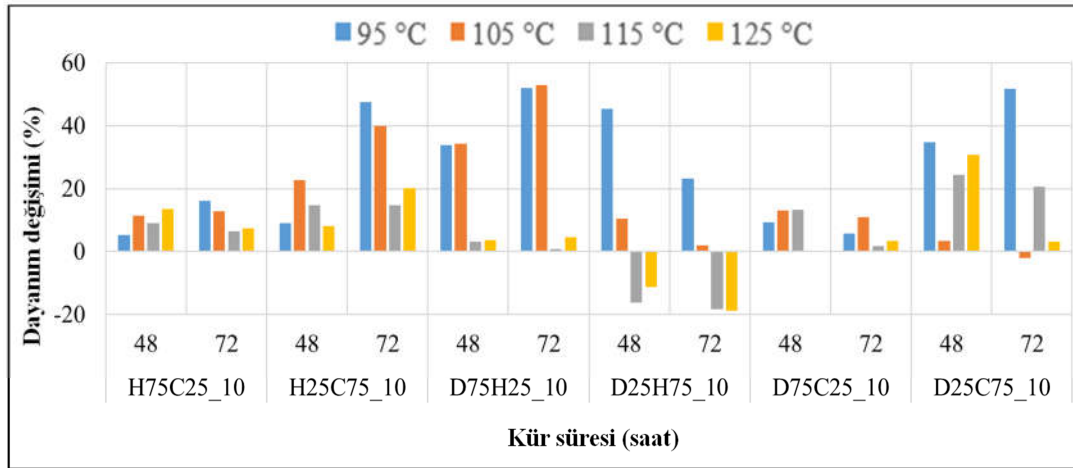
### 3.1. Kür Süresinin Etkisi

Şekil 5'te görüleceği üzere kür süresinin artışı 10 M NaOH konsantrasyonu için HT ve CK içeren H75C25\_10 ve H25C75\_10 numunelerinin basınç dayanımlarını çok fazla arttırmamıştır.

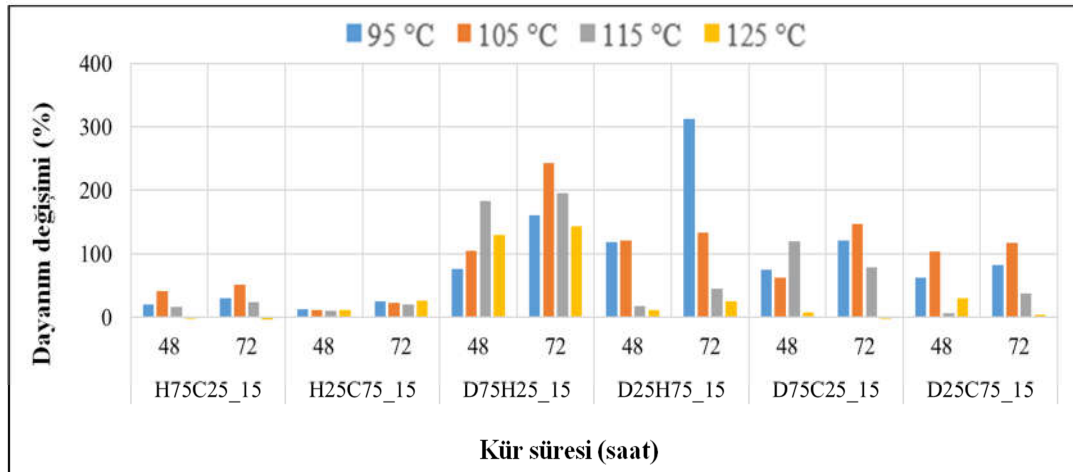
H25C75\_10 numunesinin 95 ve 105 °C sıcaklıklarda 72 saatte %40 ve %50 civarlarında dayanım artışı var gözükse de bu artışlar 24 saatteki dayanım değerlerinin çok düşük olmasındandır. Ancak 15 M NaOH konsantrasyonu olması durumunda H75C25\_15 numunesi 105 °C kür sıcaklığı altında 24 saatte 27,5 MPa dayanım kazanmışken aynı sıcaklık altında 72 saat sonunda dayanım değeri Şekil 5'te görüleceği üzere yaklaşık %50 artarak 41,5 MPa'a çıkmıştır. Bu durum yüksek molarite sayesinde daha fazla Al ve Si iyonu ortaya çıkmasından ve fazla sayıdaki bu iyonların yoğunlaşma ve çökeltme reaksiyonlarının gelişimi için daha uzun süre küre ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. 15 M NaOH durumunda ise HT ve CK içeren numunelerin artan kür süresine bağlı olarak, en fazla dayanım artışı 105 °C'de görülmek üzere 95 ve 115 °C sıcaklıklarda da dayanımları artmaya devam etmiştir. D75H25\_10 karışımlarında ise hem 95 hem de 105 °C sıcaklıklarda 48 ve 72 saat kür için sırasıyla %30 ve %50'nin üzerinde dayanım artışları görülmüştür. 115 ve 125 °C sıcaklıklarda ise 48 ve 72 saatteki dayanım artışlarının çok az olduğu görülmekte hatta küçük düşüşler göze çarpmaktadır. Ancak bu durum değerlendirilirken 24 saat için 105 ve 115 °C'deki dayanım değerlerinin 95 ve 105 °C sıcaklıktaki numunelerden çok daha büyük olduğu göz önüne alınmalıdır. Bununla birlikte DT miktarının %25'e

düşüp HT'nin %75'e çıktığı durumda 115 ve 125 °C sıcaklık ile kür edilen numunelerin 24 saatte verdiği sırasıyla 33,5 ve 31,9 MPa dayanım değerleri 48 saat kürde 28,1 ve 28,3 MPa değerine, 72 saatte ise 27,4 ve 25,9 MPa değerine düşmüştür. Bu durum harman tuğlanın daha önce bahsedildiği gibi delikli tuğlaya göre daha az

reaktif olmasından kaynaklanmaktadır. 10 M NaOH ile belirli bir miktar çözünme sağlanabildiği için ortamdaki Al ve Si iyonları miktarıyla 115 ve 125 °C'de 24 saat kür edilen numuneler optimum olgunluk değerine ulaşmış ve sonrasında yüksek sıcaklıkta devam eden kür geopolimer yapısının bozulmasına sebep olmuştur [30].



Şekil 5. 10 M NaOH içeren hamurların 24 saatten sonra 48 ve 72 saatteki dayanım değişimleri



Şekil 6. 15 M NaOH içeren hamurların 24 saatten sonra 48 ve 72 saatteki dayanım değişimleri

15 M NaOH kullanılan DT-HT karışımlarında ise Şekil 6'da görüleceği üzere kür süresinin artmasına paralel olarak dayanım değerleri artmış, yüksek reaktiviteye sahip DT'nin %75 oranında

kullanıldığı numunelerde 115 ve 125 °C sıcaklıklar için 48 ve 72 saat kür edilen numunelerde bu çalışmadaki en yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca 95 °C sıcaklık altında 24 saatte

12,3 MPa dayanım değeri veren D25H75\_15 numunesi 72 saatte 50,7 MPa değerine çıkarak, yeterli alkali ortam ve kür süresi sağlandığında göreceli olarak düşük reaktiviteye sahip numunelerin de yüksek miktarda dayanım artışı gösterebileceğini ortaya koymaktadır. DT ve CK içeren numunelere bakıldığı zaman artan kür süresi hem 10 M hem de 15 M NaOH ile aktive edilen numunelerin pek çoğunun dayanım değerlerini arttırmıştır. Bununla birlikte özellikle DT'nin daha fazla yer aldığı numunelerin yüksek sıcaklıklarda belirgin bir maksimum dayanım değeri olduğu ve bu değerden sonra dayanım artışının olmadığı görülmektedir. Örneğin D75C25\_15 numuneleri 115 ve 125 °C sıcaklıklarda 48 saatte sırasıyla 63,3 ve 55,5 MPa değerler vermiş 72 saatte ise bu değerler düşüşe geçmiştir.

### 3.2. Molaritenin Etkisi

Çizelge 2'de görüleceği üzere NaOH konsantrasyonunu 15 M değerine çıkarmak HT ve CK içeren numunelerin tamamında basınç dayanımı değerini arttırmıştır. Ancak bu durum daha az reaktif olan çatı kiremitinin %75 oranında bulunduğu numunelerde 24 saat 125 °C'de kür edilen numune haricinde daha fazla gerçekleşmiştir. Bu durum ICP-OES sonuçlarına göre daha az reaktif olan çatı kiremitinin 15 M NaOH çözeltisinde daha fazla çözünmesiyle gerçekleşmiştir. Daha önce belirtildiği üzere bu çalışmada kullanılan HT, ÇK ve DT 10 M NaOH çözeltisinde çözülerek ICP-OES ile analiz edilmiştir. Ancak malzemelerin 15 M NaOH

çözeltisinde ne kadar çözünecekleri analiz edilmemiştir. Molaritenin artışıyla %25 HT ve %75 CK içeren numunelerin dayanımlarındaki bu hızlı artış harman tuğlasının daha yüksek molarite değerlerinde daha fazla iyon serbest bırakabildiği, çatı kiremitinin ise serbest bıraktığı iyon miktarının harman tuğlasının kadar artmadığı şeklinde yorumlanmaktadır. Buradan her bir geopolimer hammaddesi için optimum NaOH konsantrasyonu değerinin farklı olduğu görülmektedir.

DT-HT ve DT-CK karışımlarına bakılınca ise özellikle DT'nin %75 olarak yer aldığı karışımlarda düşük sıcaklıkta 24 saat kür edilen numunelerin NaOH molaritelerinin artırılması dayanım değerlerinde düşüşe yol açmıştır. Bu durum molaritenin yükselmesi ile birlikte ortamda miktarı artan serbest iyonların düşük sıcaklık ve sürede yeterince yoğunlaşamayıp reaksiyon ürünü oluşturamayışına atfedilmiştir. Ayrıca yeterince reaksiyon ürünü oluşmadığı için N-A-S-H olarak bağlanmayan serbest sodyum içeriğinin ortamdaki CO<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek karbonatlaşma reaksiyonu göstermesi ve bunun sonucunda polimerizasyonun kesintiye uğraması ile ilişkilendirilmektedir [31, 32]. Ancak sıcaklığın 115 °C'ye çıkmasıyla delikli tuğladan çözülen Si ve Al iyonları daha fazla Na iyonu ile birleşerek N-A-S-H oluşumu gerçekleşmektedir. Burada görüleceği üzere delikli tuğlanın yüksek reaktivitesini ortaya koyabilmesi için molariteye paralel olarak kür sıcaklığının ve süresinin de artırılması gerekmektedir.

**Çizelge 2.** 10 M NaOH yerine 15 M NaOH kullanılıncaya numunelerde görülen basınç dayanım artışı (%)

Numune	H75C25			H25C75			D75H25			D25H75			D75C25			D25C75		
	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72
Kür Süresi (saat)	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72	24	48	72
95 °C	6,7	22,2	20,1	150,0	157,6	111,3	-39,6	-20,4	3,5	-43,1	-14,6	90,6	-23,5	22,3	59,8	19,0	43,2	43,5
105 °C	25,6	59,0	68,0	119,1	100,0	92,5	-29,1	8,0	59,2	-26,3	47,3	68,6	-21,3	13,0	74,8	-27,8	42,3	60,2
115 °C	20,9	28,7	40,8	63,0	56,8	71,0	-25,3	105,2	119,3	14,0	60,1	101,8	-18,6	57,9	42,8	50,7	29,3	72,2
125 °C	33,5	15,7	15,4	21,8	26,1	28,2	-13,9	90,7	100,3	20,7	51,6	85,7	70,2	83,2	61,9	50,0	48,8	51,9

#### 4. SONUÇLAR

Yürütülen bu çalışma sonucunda harman tuğlası, delikli tuğla ve çatı kiremitinin NaOH ile aktive edilerek yüksek dayanımlı (>50 MPa) bağlayıcılar üretilebileceği görülmüştür. 10 M NaOH ile 115 °C'de 48 saat kür edilen D75C25\_10 numunesi 50 MPa civarında değer vermiştir. NaOH molaritesinin 15 M olması durumunda 115 ve 125 °C'de 48 ve 72 saat kür edilen D75H25\_15 numuneleri 50 MPa değerinin çok üstünde basınç dayanımı sonuçları vermiştir. Bununla birlikte malzemelerin karışım oranlarının değişimine bağlı olarak optimum aktivatör molaritesi, kür sıcaklığı ve süresi, kiremit ve tuğla atıklarının içerdiği reaktif SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarlarına ve oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca hammaddelerin SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriklerinden bağımsız olarak sahip oldukları Si ve Al iyonu salma kapasiteleri, geopolimerizasyon reaksiyonlarının ilk aşaması olan çözünmeyi ve dolayısıyla reaksiyonun geri kalan kısımlarını doğrudan etkilemektedir. Malzemelerin Al ve Si salma kapasitelerine göre bir malzeme karışım dizayn metodu oluşturulabilir ancak aktivatör tipi ve molaritesi de dikkate alınmalıdır.

Yüksek reaktiviteye sahip olan hammaddelerin çözünmesi ve geopolimerizasyonu nispeten hızlı gerçekleşirken, düşük reaktiviteye sahip olan hammaddelerin daha yüksek molaritede aktivatör ve uzun süreli kür ile nihai performansları arttırılabilmektedir. Özellikle reaktif Si eksikliği çeken harman tuğlasının kullanıldığı durumlarda aktivatör olarak sodyum hidroksitle beraber sodyum silikat kullanılması da düşünülebilir.

Bu çalışmada ikili karışım oranları için elde edilen optimum aktivatör, kür sıcaklığı ve süresi değerleri ışığında üçlü karışımların üretilmesi de düşünülebilir. Böylece farklı malzeme oranlarına sahip üçlü karışımların optimum aktivatör molaritesi, kür sıcaklığı ve süresi değerleri belirlenip, inşaat yıkıntısından alınan atık tuğla ve kiremitlerin karışım içindeki oranları belirlendikten sonra ayrıştırılmalarına gerek kalmadan kullanılabilmesinin önü açılacaktır.

#### 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 218M102 ve 119M630 ve 117M447 numaralı projeler ile desteklenmiş olup yazarlar desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

#### 6. KAYNAKLAR

1. Worrell, E., Price, L., Martin, N., 2001. Carbon Dioxide Emissions From The Global Cement Industry. *Annu. Rev. Energy Environ.*, 26, 303–29.
2. Pavlu, T., 2018. The Utilization of Recycled Materials for Concrete and Cement Production -A Review. 1<sup>st</sup> FIB Conference on Sustainable Concrete - Materials and Structures. Malta.
3. Machado, I.L., Moya, H.I., Sanchez, S.B., Martinera, F., 2017. Improvement of the Environmental Energy Sustainability in the Production of Cement Portland with Addition of Thermally Activated Clays. 2<sup>nd</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Havana.
4. Dutta, B., Maity, S., 2015. CO<sub>2</sub> Abatement During Production of Low Carbon Content Cement. 1<sup>st</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Zurich.
5. Dutta, B., Maity, S., 2015. Role of Blended Cement in Reducing Energy Consumption. 1<sup>st</sup> International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete. Zurich.
6. Gartner, E., Hirao, H., 2015. A Review of Alternative Approaches to the Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions Associated with the Manufacture of the Binder Phase in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 78, 126-142.
7. Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., 2010. Reusing Ceramic Wastes in Concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832-838.
8. Provis, J.L., van Deventer, J.S., 2009. *Geopolymers Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.
9. Wastiels, J., Wu, X., Faignet, S., Patfoort, G., 1993. Mineral Polymer Based on Fly. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Solid Waste Management*. Philadelphia,.

10. Swanepoel, J.C., Strydom, C.A., 2002. Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material. 5<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Geochemistry, Cape Town.
11. van Jaarsveld, J.G., van Deventer, J.S., Lukey, G.C., 2002. The Effect of Composition and Temperature on the Properties of Fly Ash- and kaolinite-based Geopolymers. Chemical Engineering Journal, 89(1-3), 63-73.
12. Perera, D.S., Vance, E.R., Cassidy, D.J., Blackford, M.G., Hanna, J.V., Trautman, R.L. 2005. The Effect of Heat on Geopolymers Made Using Fly Ash and Metakaolinite. 106<sup>th</sup> Annual Meeting of the American-Ceramic-Society, Indianapolis, 165, 87-94.
13. Glukhovskiy, V., 1967. Hydration and Structurization of Slag-Alkali Binder. Soil Silicate Articles and Constructions. Kiev.
14. Provis, J.L., Myers, R. J., White, C. E., Rose, V., & van Deventer, J. S. (2012). X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders. Cement and Concrete Research, 42, 855-864.
15. Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D., 2006. Hydration and Microstructure. Alkali-Activated Cements and Concretes (s. 98). içinde New York: Taylor & Francis Group.
16. Provis, J.L., Bernal, S.A., 2014. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. Annu. Rev. Mater. Res., 44(299-327), 299-327.
17. Cristelo, N., Fernandez-Himenez, A., Vieira, C., Miranda, T., Palomo, A., 2018. Stabilisation of Construction and Demolition Waste with a High Fines Content Using Alkali Activated Fly Ash. Construction and Building Materials, 170, 26-39.
18. Robayo-Salazar, R.A., Rivera, J.F., de Gutierrez, R.M., 2017. Alkali-activated Building Materials Made with Recycled Construction and Demolition Wastes. Construction and Building Materials, 149, 130-138.
19. Robayo, R.A., Mulford, A., Munera, J., de Gutierrez, R.M., 2016. Alternative Cements Based on Alkali-activated Red Clay Brick Waste. Construction and Building Materials, 128, 163-169.
20. Robayo-Salazar, R.A., Mejia-Arcila, J.M., de Gutierrez, R.M., 2017. Eco-efficient Alkali-Activated Cement Based on Red Clay Brick Wastes. Journal of Cleaner Production, 166, 242-252.
21. Reig, L., Tashima, M.M., Borrachero, M.V., Monzo, J., Cheeseman, C.R., Paya, J., 2013. Properties and Microstructure of Alkali-Activated Red Clay Brick Waste. Construction and Building Materials, 43, 98-106.
22. Singh, S., Basavanagowda, S.N., Aswath, M.U., Ranganath, R.V., 2016. Durability of Bricks Coated with Red Mud Based Geopolymer Paste. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
23. Vafaei, M., Allahverdi, A., 2017. High Strength Geopolymer Binder Based on Waste-glass Powder. Advanced Powder Technology, 28, 215-222.
24. Hajimohammadi, A., Ngo, T., Kashani, A., 2018. Sustainable One-part Geopolymer Foams with Glass Fines Versus Sand as. Construction and Building Materials, 171, 223-231.
25. Vasquez, A., Cardenas, V., Robayo, R.A., de Gutierrez, R.M., 2016. Geopolymer Based on Concrete Demolition Waste. Advanced Powder Technology, 27, 1173-1179.
26. Abdel-Gawwad, H.A., Heikal, E., El-Didamony, H., Hashim, F.S., Mohammed, A.H., 2018. Recycling of Concrete Waste to Produce Ready-mix Alkali Activated Cement. Ceramics International, 44, 7300-7304.
27. Deb, P.S., Nath, P., Sarker, P.K., 2014. The Effects of Ground Granulated Blast-furnace Slag Blending with Fly Ash and Activator Content on the Workability and Strength Properties of Geopolymer Concrete Cured at Ambient Temperature. Materials and Design, 62, 32-39.
28. Hojati, M., Radlinska, A., 2017. Shrinkage and Strength Development of Alkali-activated Fly ash-slag Binary Cements. Construction and Building Materials, 150, 808-816.
29. Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., van Deventer, J.S., 2007. Geopolymer Technology: The Current State of the Art. Journal of Materials Science, 42, 2917-2933.
30. Ken, P.W., Ramli, M., Ban, C.C., 2015. An Overview on the Influence of Various Factors on the Properties of Geopolymer Concrete



Derived from Industrial By-products.  
Construction and Building Materials, 77,  
370-395.

31. Barbosa, V.F., Mackenzie, K.J., Thaumaturgo, C., 1999. Synthesis and Characterisation of Sodium Polysialate Inorganic Polymer Based on Alumina and Silica. Geopolymer International Conference. Fransa.
32. Abdullah, M.A., Kamarudin, H., Mohammed, H., Khairul Nizar, I., Rafiza, A.R., Zarina, Y., 2011. The Relationship of NaOH Molarity,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  Ratio, Fly Ash/Alkaline Activator Ratio, and Curing Temperature to the Strength of Fly Ash-Based Geopolymer. Trans Tech Publications, 328-330, 1475-1482.



## Gözebaşı Köyü (Elazığ Güneyi) Çevresindeki Yüksekova Karmaşığı'na Ait Volkanik Kayaçların Jeokimyasal Özellikleri

Melek URAL<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ

Geliş tarihi: 22.01.2020 Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Çalışma alanı Güneydoğu Anadolu Orojenik Kuşağı içerisinde, Elazığ İli'nin yaklaşık 30 km güneyinde yer almaktadır. Bu alandaki Üst Kretase yaşlı Yüksekova Karmaşığı volkanik kayaçları, plajiyoklas, klinopiroksen, alkali feldispat, olivin ve manyetit, ilmenit gibi opak oksit mineralleri içermektedir. Kayaçlarda, intergranüler, glomeroporfirik, hyalomikroporfirik ve amigdaloidal dokular yaygındır. Kayaçların petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri bazaltik bileşim ve toleyitik karakteri yansıtmaktadır. Kayaç örneklerinin N-MORB'a normalize edilmiş iz element dağılımları baz alındığında; LIL elementler değişkenlik göstermekle birlikte, genel olarak HFS elementlere göre zenginleşmişlerdir. Örneklerin nadir toprak element dağılımları yatay bir desen sergilemektedir. Sonuç olarak; jeokimyasal veriler, Gözebaşı Köyü (Elazığ Güneyi) çevresindeki volkanik kayaçları veren magmanın gelişiminde dalan okyanus kabuğu katkısına ve bu kayaçların bir okyanus içi yitimle ilişkili olarak geliştiklerine işaret etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Gözebaşı (Elazığ Güneyi), Yüksekova Karmaşığı, Jeokimya

### Geochemical Properties of the Volcanic Rocks of Yüksekova Complex Around Gözebaşı Village (South of Elazığ)

#### Abstract

The study area is located in the Southeastern Anatolia Orogenic Belt, approximately 30 km south of Elazığ Province. The rocks contain plagioclase, clinopyroxene, alkaline feldspar, olivine and opaque oxide minerals such as magnetite, ilmenite. Intergranular, glomeroporphyritic, hyalomikroporphyritic and amygdaloidal textures are common. Petrographic and geochemical characteristics of the rocks reflect basaltic composition and tholeiitic character. Considering to N-MORB normalized trace element distributions, the rock samples show LIL elements variations, but they show enrichments in large ion lithophile elements (LILE) relative to high field strength elements (HFSE). The rare earth element distributions of the samples exhibit a flat pattern. As a result; all geochemical data point that the contribution of subducted oceanic crust in development of the magma forming volcanic rocks around Gözebaşı village (Elazığ South).

**Keywords:** Gözebaşı (South of Elazığ), Yüksekova complex, Geochemistry

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Melek URAL, [melekural@firat.edu.tr](mailto:melekural@firat.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Çalışma alanı Güneydoğu Anadolu Orojenik Kuşağı boyunca, Elazığ İli'nin yaklaşık 30 km güneyinde yer almaktadır (Şekil 1). Neotetis'in kalıntıları olan ofiyolitler ve ofiyolitik melanjlara Güney Neotetis okyanusunun kapanması safhasında Geç Mesozoyik ve erken Tersiyer dönemlerinde meydana gelmişlerdir [1-11]. Bu melanj dilimlerinden olan "Yüksekova Karmaşığı" ilk defa [13] tarafından Hakkari civarındaki okyanus içi yay birimleri için tanımlanırken, [14] tarafından Elazığ civarındaki Üst Kretase yaşlı kırmızı-yeşil kireçtaşı, şeyl, kumtaşı, volkanik kumtaşı, tuf, aglomera, bazalt, diyabaz, gabro,

serpantinit, granit ve granodiyorit olarak ayırtlanan litolojiler için kullanılmıştır. Elazığ çevresinde yapılan çalışmalarda birçok araştırmacı, aynı ismi benimsemiştir [10,12,15-33,69-70]. Buna karşın [34], Yüksekova Karmaşığı tanımını Kampaniyen-Maastrichtiyen yaşlı volkanosedimanter birimlerle beraberindeki ofiyolitler ve granitik kayaçlar için kullanmıştır. [19,35,36] bu tanıma, amfibolitler, granitik kayaçlar, diyabazlar, yastık lavlar, andezitler, andezitik piroklastik kayaçlar, dasitler ve mikritik kireçtaşları kapsamında kullanmışlardır. [37], Sivrice-Elazığ arasında kendi içinde ekaylanmış tektonik dilimleri Elazığ volkanik karmaşığı olarak ele almıştır.



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası

Elazığ İli çevresinde yüzeyleyen Üst Kretase yaşlı volkanik kayaçlar, Yüksekova Karmaşığı'nın batıya doğru uzantısıdır [13,14,38]. Bu çalışmada; Gözebaşı (Elazığ Güneyi) çevresindeki (Şekil 1) Yüksekova Karmaşığı'na ait volkanikleri tüm kayaç jeokimyasal özellikleri açısından karakterize ederek, petrotektonik ortamlarını ortaya koymak amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

Gözebaşı köyü çevresindeki Yüksekova karmaşığına ait bazik bileşimli volkanik kayaçlardan 35 adet örnek alımı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen örneklerden Fırat

Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği İnce Kesit laboratuvarında, ince kesitler yaptırılmıştır. Daha sonra ince kesitler polarizan mikroskopta 25X büyütmede incelenmiş ve mikrofotografı alınmıştır. Bu incelemeler sonucunda kayaçların mineralojileri, dokusal özellikleri ve kayaç sınıflamaları yapılmıştır. Petrografik gözlemler sonucunda tüm kayaç kimyasal analizleri için en uygun olan örneklerden 18 tanesine ait tüm kayaç ana oksit, iz ve nadir toprak element analizleri (Ek Çizelge 1) yaptırılmak üzere ACME Analitik laboratuvarları'na gönderilmiştir. Analiz sonuçları Grapher 8.0 programı yardımıyla grafiksel ortama aktarılmıştır. Petrotektonik ortam sınıflama diyagramları ile kayaçlar jeokimyasal olarak

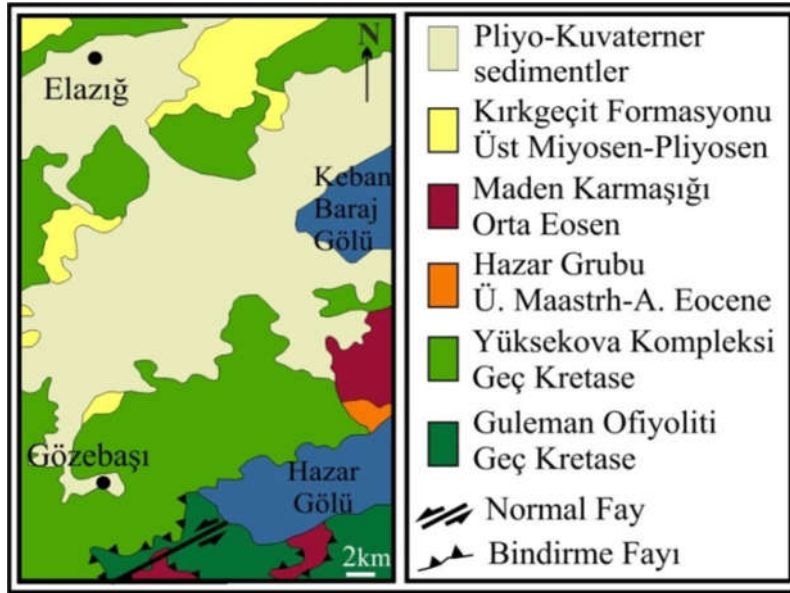
yorumlanmıştır. Ana oksitler, ICP-AES (Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy), iz ve nadir toprak element analizleri ise ICP-MS (inductively coupled plasma-mass spectrometry) ile gerçekleştirilmiştir.

### 3. BÖLGESEL JEOLJİ

İnceleme alanında yüzlek veren birimler başlıca Yüksekova Karmaşığı, Guleman-Kömürhan Ofiyolitleri, Kırkgeçit Formasyonu ve Pliyo-Kuvaterner sedimentlerdir. Çalışma alanında, Üst Kretase yaşlı Yüksekova Karmaşığı [13,14], Üst Kretase yaşlı Guleman-Kömürhan Ofiyolitlerine ait harzburjit, dünit, lerzolitlerden oluşan manto peridotitleri üzerinde tektonik olarak yer almaktadır. Birim çalışma alanının kuzeyinde Orta Eosen-Üst Oligosen yaşlı Kırkgeçit Formasyonu

sedimanlarınca [39,40] ve yaygın olarak da Pliyo-Kuvaterner yaşlı alüvyal sedimanlarca [41,42] uyumsuzlukla örtülmektedir (Şekil 2).

Neotetis'in güney kolunun Üst Triyas'tan itibaren Arap platformu ile Keban Bitlis Pütürge masifleri arasında açılmaya başladığı [1,13,14,43] ve geç Mesozoyik'ten itibaren ise yitildiği kabul edilir (3,6,44). Güney Neotetis okyanusal kabuk oluşumu bazı araştırmacılar tarafından tek bir yitimle açıklanırken [45-52], bazıları ise çiftli dalım modelini benimsemişlerdir (7,9,10,12,53-55). Yitim sürecinin tamamlanmasının ardından Orta Eosen-Geç Pliyosen aralığında genişleme, sıkışma ve faylanmalar egemen olmuştur (27,56-60).



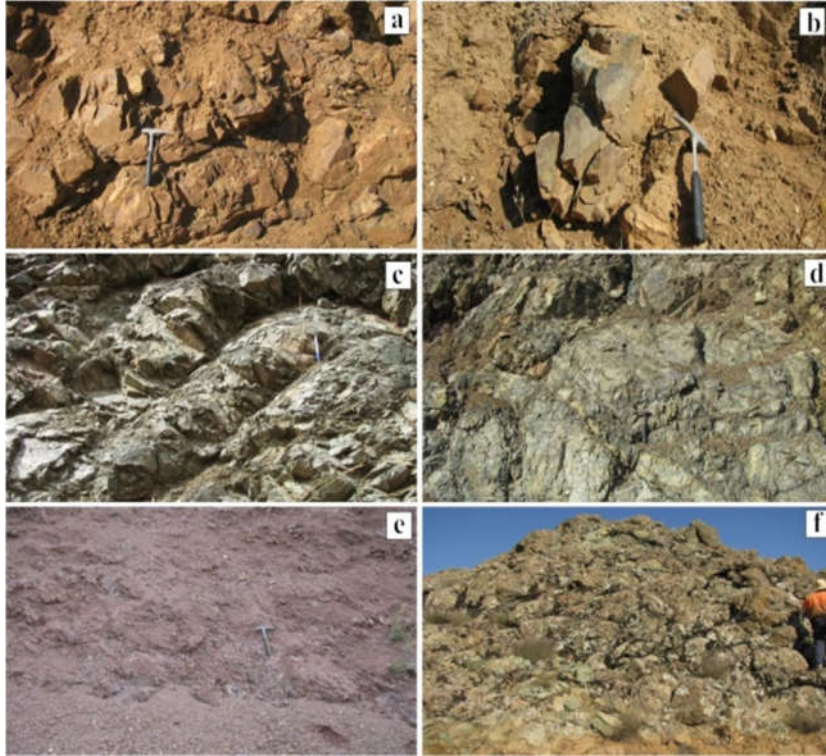
Şekil 2. Çalışma alanının basitleştirilmiş jeoloji haritası [62,63]'ten sadeleştirilerek alınmıştır)

Yüksekova Karmaşığı'nın, Neotetis okyanusunun kapanması sırasında gelişen okyanus içi yay ve yay ardı kaotik melanj dilimleri oldukları ve bu birimin volkanoklastitler ile masif ya da yastık yapılı lavlar, bunları besleyen dayklar, yeşil-kırmızı çamurtaşları ile radyolaryalı çörtlerden oluştuğu düşünülmektedir [10-12]. Birimin Van civarındaki toleyitik, kalk-alkalen karakterli

yüzleklerinden Ar-Ar radyometrik yaşlandırma yöntemiyle  $113 \pm 3$  milyon yıl ile  $66,5 \pm 0,3$  milyon yıllık yaşlar saptanmıştır [61]. Yüksekova Karmaşığı'nın melanjlarıyla birincil ilişkili okyanusal sedimentleri paleontolojik olarak yaşlandıran araştırmacılar ise bu birimin Senomaniyen-Maastrhiyen yaş aralığında oluştuğunu kabul etmektedirler [10,32,33].

İnceleme alanındaki volkanik kayaçlar genel olarak bol kırık çatlaklı, kısmen altere ve değişken renk ve morfolojilere sahiptirler (Şekil 3a-f). Bordo renkli çamurtaşlarıyla ara katkılı volkanitler masif-kırılğan yapıdayken, yeşil renkli kısmen epidotlaşmış ve kloritleşmiş volkanitler belirgin

topoğrafyalı ve çoğunlukla da yastık yapılı kayaçlar olarak yüzeyleme verirler (Şekil 3a, 3c, 3f). Lobumsu, elipsoidal yastıklar metresel boylara ulaşabilmektedir (Şekil 3a-f).



**Şekil 3.** İnceleme alanındaki volkanik kayaçların arazi görünümü, a) Yassı şekilli yastık lavlar, b) Masif bazaltlar, c) Üst üste binmiş yastık lav ve lav akmaları, d) Yeşil renkli masif bazaltlar, e) Çamurtaşlarıyla ara katkılı volkanitler, f) Spilitleşmiş pillow lavlar

#### 4. PETROGRAFI

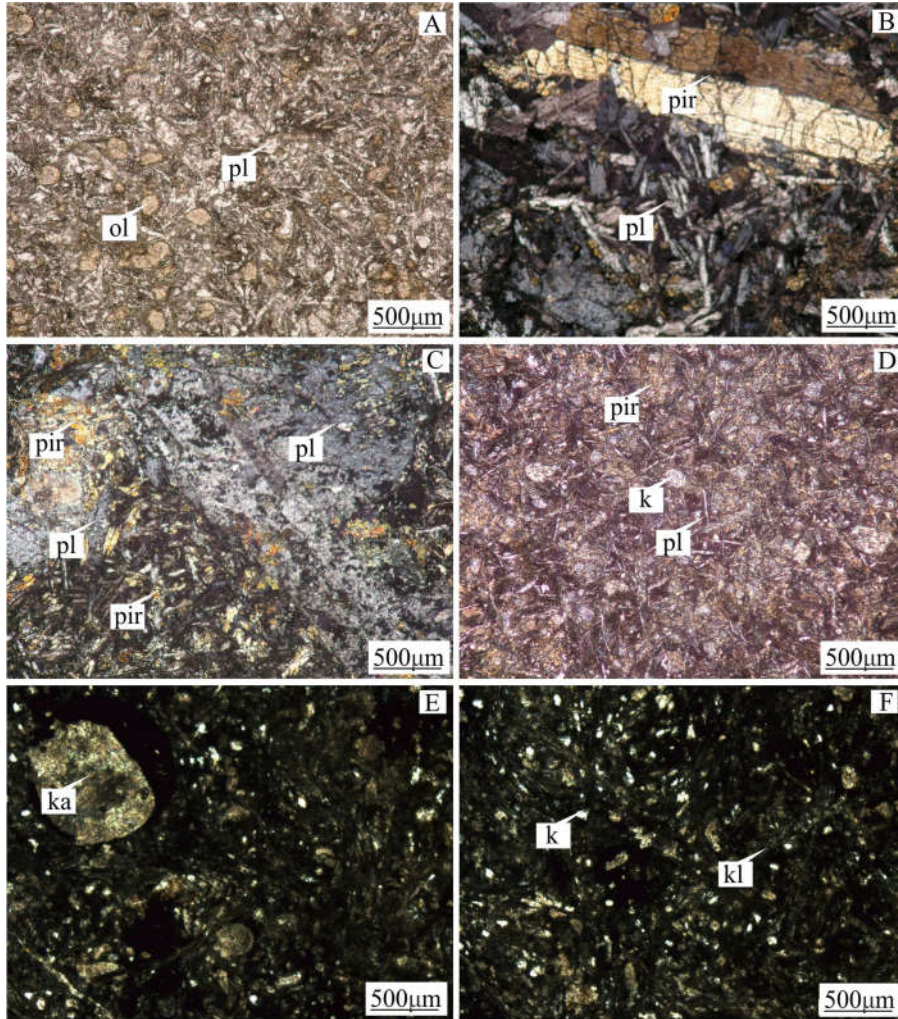
İnceleme bölgesinde mineralojik ve dokusal açıdan ele alınan bazaltik volkanik kayaçlar bolluk sırasına göre, plajiyoklas, klinopiroksen, alkali feldspat, olivin ve manyetit, ilmenit gibi opak oksit mineralleri içermektedirler (Şekil 4 a-f).

Plajiyoklazlar, prizmatik, latalar halinde, bazılarında varyolitik, ışımsal ya da demetimsi olarak bulunur (Şekil 4 a-d). Plajiyoklas lataları arasında piroksen yerleşimleri ile intergranüler dokular gelişmiştir (Şekil 4b). İnce ince küçük

mikrolitik plajiyoklaz latalarına yer yer sferulitik epidotlar, kuvars dolguları ve kloritler eşlik ederek bazen intersertal dokular oluştururlar. Orta taneli plajiyoklaz latalarına (az miktarda serisitleşme), kalıntı ve bazen de epidotlaşmış piroksenler eşlik ederler. (Şekil 4a). Piroksenler yer yer kalıntı şeklinde ve ojittirler. Kısmen camsı kısmen ise mikrolitik plajiyoklaslardan ibaret hamurun içerisinde iri fenokristaller hiyalomikrolitik porfirik dokuyu oluştururlar (Şekil 4a, 4f). Mikrolitik plajiyoklas lataları içerisinde felsik ve mafik fenokristaller bazen mikrolitik porfirik bazen de subofitik (Şekil 4b) ya da poikilitik dokular

(Şekil 4c) oluştururlar. Kümelmiş feldispat ve piroksenler glomeroporfirik dokulu bir desen de oluştururlar (Şekil 4b, 4c). Gözenekleri silis, kalsit,

klorit ve bazen de zeolit dolgulu amigdalooidal dokulu bazaltlar da mevcuttur (Şekil 4e).



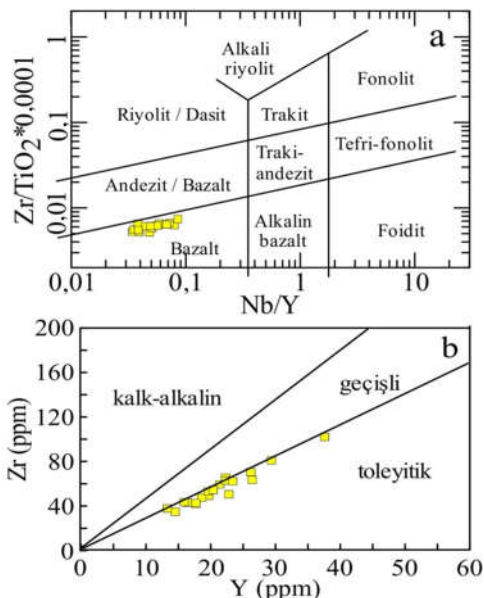
**Şekil 4.** İncelenen kayaçların mikroskop görüntüleri a) Amigdalooidal bazalt, b) Subofitik dokulu bazalt, c) Glomeroporfirik dokulu bazalt, d) Hiyalomikrolitik porfirik dokulu bazalt, e) Amigdalooidal bazalt, f) Hiyalomikrolitik bazalt (Ç.N.; pl: plajiyoklas, pir: piroksen, k: kuvars, ol: olivin, ka: kalsit, kl: klorit)

Kayaçlarda gözlenen olağan alterasyonlar ise şöyledir: İkincil ve üçüncül kalsit ile silis damar ve dolguları, epidotlaşma (piroksenlerden itibaren), kloritleşme (piroksenlerden itibaren), opaklaşmadır (Şekil 4f). Kalsit damar ve dolguları içerisinde gelişmiş üçüncül silis dolguları da mevcuttur.

İkincil kuvarslar bazen iskeletimsi bir dokuya sahiptirler. Alkali feldspatlar zaman zaman killeşme gösterirler. Kayaçlarda hamurdan ve mafik minerallerden itibaren kloritleşmeler ve epidotlaşmalar gözlenebilmektedir. Hamurdan itibaren opaklaşmalar da mevcuttur.

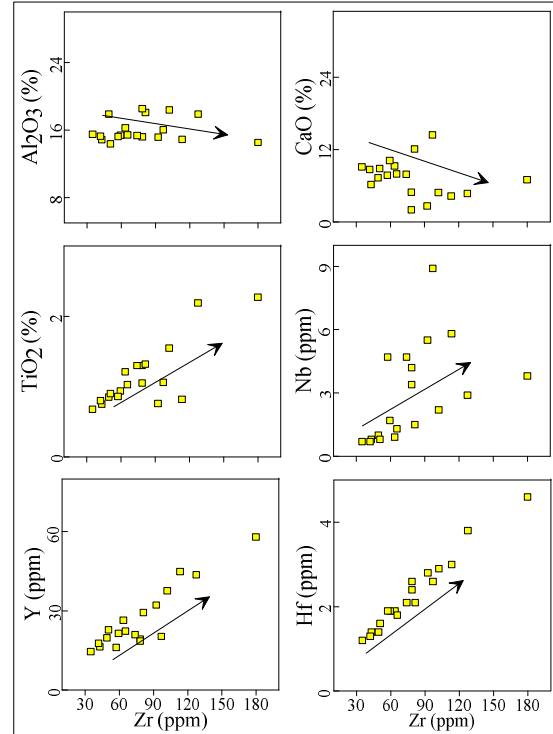
## 5. JEOKİMYA

Gözebaşı (Elazığ Güneyi) çevresinde yüzeylenen Yüksekova Karmaşığı'na ait ana element (%), iz element (ppm) ve nadir toprak element (ppm) analiz verileri Ek Çizelge 1'de sunulmuştur. İncelenen volkanik kayaçlardan ele alınan kayaçların hepsi bazaltik bileşim sergilemişlerdir (Şekil 5a). Bu kayaçlar aynı zamanda toleyitik karakteri yansıtmaktadırlar (Şekil 5b).



**Şekil 5.** İncelenen volkanik kayaçların a) Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub>\*0.0001 diyagramındaki [64] dağılımları, b) Zr'a karşı Y diyagramındaki [65,66] tarafından revize edilmiştir) konumları

İncelenen kayaçların ateşte kayıp değerlerinin yüksek olması nedeniyle tüm kayaç petrokimyasal değişim diyagramlarında hareketsiz ve indeks element olarak değerlendirilen Zr elementi kullanılmıştır. Buna göre, Zr elementine karşı; TiO<sub>2</sub>, Y, Nb, Hf elementleri pozitif korelasyon gösterirken, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO elementleri ise negatif korelasyon göstermektedir (Şekil 6). İncelenen örneklerin ikili değişim diyagramlarındaki dağılımları, fraksiyonel kristallenme ile tutarlı yönsemeler sergilerler. Bunlardan temsili olanları Şekil 6'da sunulmuştur.

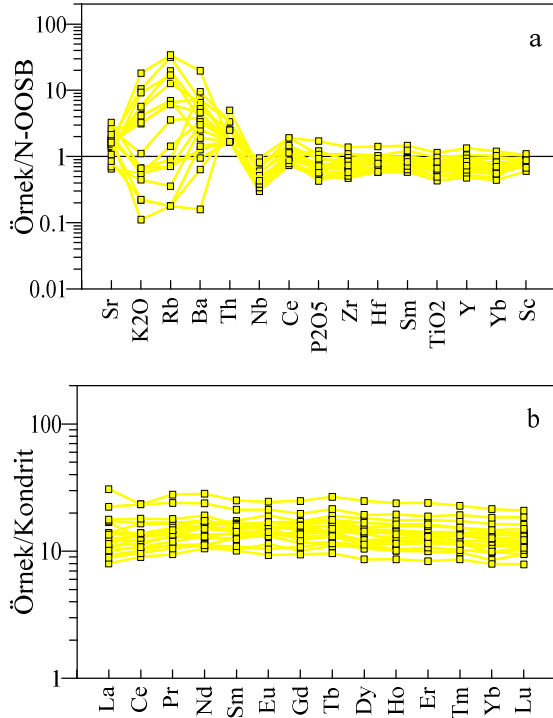


**Şekil 6.** Zr elementinin bazı oksit ve elementlere karşı çizilmiş ikili değişim diyagramları

Kayaç örneklerinin N-tipi Okyanus Ortası Sırtı Bazaltına (N-MORB) normalize edilmiş iz element dağılımlarına göre; 1) Büyük iyon yarıçaplı (Light ion lithophile-LIL) elementler (Sr, K, Rb, Ba ve Th) bazı örneklerde tüketilmiş olmakla birlikte, yüksek alan gerilmeli (High field strength-HFS) elementlere (Ta, Nb, Hf, Zr, Y, Ti) göre genel olarak zenginleşmiş, 2) Yüksek yüklü ve kalıcılığı yüksek elementler (High field strength elements-HFSE) bakımından ise yaklaşık okyanus ortası sırtı bazalt (Mid-ocean ridge bazalt- MORB) çizgisine paralel, fakat MORB'a göre nisbeten daha fazla fakirleşmişlerdir (Şekil 7a).

Örneklerdeki belirgin olmayan negatif Ti anomalisi ile belirgin negatif Nb anomalisi yitim katkısına işaret etmektedir (Şekil 7a). Kayaç örneklerinin, kondrite göre normalize edilmiş nadir toprak element desenleri ise; yaklaşık yataydır (La<sub>N</sub>/Sm<sub>N</sub>: 0,40-0,83; La<sub>N</sub>/Lu<sub>N</sub>: 0,09-0,22) (Şekil 7b). Ancak kondrite oranla yaklaşık 10 ila 30 kata kadar zenginleşme gözlenmektedir.





Şekil 7. İncelenen kayaların, a) N-MORB ve b) Kondrite göre normalize edilmiş diyagramları. Normalize değerler, [67]'dan alınmıştır

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

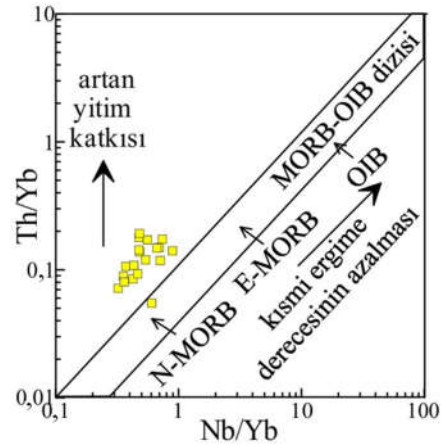
Üst Kretase yaşlı Yüksekova Karmaşığında ait incelenen örnekler, Güneydoğu Anadolu Orojenik kuşağı içerisinde bulunup, ofiyolitik melanj dilimlerinden oluşmaktadır. Bu dilimler, yer yer masif yapıya yer yer ise yastık lavlardan oluşur.

İnceleme alanında yüzeleme veren volkanik kayalar esasen bazalt kompozisyonundadır. Aynı zamanda toleyitik karakterlidir. Bu kayaların mineralojik bileşimlerinde esas olarak plajiyoklas, klinopiroksen ve psödomorf olivinden oluşmaktadır. Kayalar; hiyalomikrolitik porfirik ve amigdaloidal dokuludurlar.

Kayaç örneklerinin ikili değişim diyagramları ana oksitler için hareketliliğin varlığını ortaya koyarken, iz elementlerden yola çıkılarak kayaların evrimine dair yorum yapılabilir. Buna göre okyanus tabanı metazomatizması karşısında

nisbeten duraylı olan ikili korelasyonlar, piroksen ve olivin gibi mafik fenokristalen fazlar geliştiğini göstermektedir. Böylelikle, kayaları oluşturan mekanizmanın fraksiyonel kristalleşme olduğu söylenebilir. Kayaç örneklerinin N-MORB a ve C1 kondrite normalize edilmiş iz element dağılım desenleri okyanus içi yitim ve bununla beraber dalan okyanus kabuğunun katkısına işaret etmektedir (Şekil 7).

Kayaçların Nb/Yb a karşı Th/Yb diagramında [68] gözlenen yüksek Th/Yb oranları ise, bunların N-MORB'a nazaran ve yitim katkısıyla zenginleştiklerini işaret etmektedir (Şekil 8). Sonuç olarak, bu çalışma Yüksekova Karmaşığı'na ait volkanik kayaların Gözebaşı çevresindeki yüzleklerinin, bir okyanus içi yay ürünü olarak meydana geldiklerini ortaya koymaktadır.



Şekil 8. İncelenen kayaların Nb/Yb'a karşı Th/Yb diyagramındaki dağılımları [68]

## 7. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi FÜBAP-MF.18.28 nolu proje ile desteklenmiştir.

## 8. KAYNAKLAR

1. Göncüoğlu, M.C., Turhan, N., 1984. Geology of the Bitlis Metamorphic Belt. In: Tekeli, O., and Göncüoğlu, M.C. (Eds), The Geology of the Taurus Belt, International Symposium on

- the Geology of the Taurus Belt, Proceedings, 237-244.
2. Göncüoğlu, M.C., Dirik, K., Kozlu, H., 1997. General Characteristics of Pre-alpine and Alpine Terranes in Turkey: Explanatory notes to the terrane map of Turkey: Annales Geologique de Pays Hellenique, Annales Geologique de Pays Hellenique, 37, 515-536.
  3. Robertson, A.H.F., 2002. Overview of the Genesis and Emplacement of Mesozoic Ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan Region. Lithos, 65, 1-67.
  4. Robertson, A.H.F., 2004. Development of Concepts Concerning the Genesis and Emplacement of Tethyan Ophiolites in the Eastern Mediterranean and Oman Regions. Earth Sci. Rev., 66, 331-387.
  5. Göncüoğlu, M.C., 2014. Comments on a Single Versus Multiarmed Southern Neotethys in SE Turkey and Iran. 3<sup>rd</sup> Intern. Symp., of IGCP 589 Development of the Asian Tethyan Realm. Abstr. and Proceed., 89-95.
  6. Göncüoğlu, M.C., 2019. A Review of the Geology and Geodynamic Evolution of Tectonic Terranes in Turkey. In Mineral Resources of Turkey, Springer, Cham., 19-72.
  7. Rızaoğlu, T., Parlak, O., Höck, V., İslar, F., 2006. Nature and Significance of Late Cretaceous Ophiolitic Rocks and its Relation to the Baskil Granitoid in Elazığ Region, SE Turkey. Geological Society of London, Special Publications, 260, 327-350.
  8. Rızaoğlu, T., Parlak, O., Höck, V., Koller, F., Hames, W.E., Billor, Z., 2009. Andean Type Active Margin Formation in the Eastern Taurides: Geochemical and Geochronological Evidence from the Baskil Granitoid, SE Turkey. Tectonophysics 473, 188-207.
  9. Robertson, A.H.F., Parlak, O., Rızaoğlu, T., Ünlügenç, U.C., İnan, N., Taslı, K., Ustaömer, T., 2007. Tectonic Evolution of the South Tethyan Ocean: Evidence from the Eastern Taurus Mountains (Elazığ Region, SE Turkey). In: A.C. Ries, R.W.H. Butler, and R.H. Graham (Eds.), Deformation of the Continental Crust. The Legacy of Mike Coward, Geol. Soc. London Spec. Publ., 272, 231-270.
  10. Tekin, U.K., Ural, M., Göncüoğlu, M.C., Arslan, M., Kürüm, S., 2015. Upper Cretaceous Radiolarian Ages from an Arc-back-arc Within the Yüksekova Complex in the Southern Neotethys Mélange, SE Turkey. Comptes Rendus Palevol, 14(2), 73-84.
  11. Ural, M., Göncüoğlu, M.C., Arslan, M., Tekin, U.K., Kürüm, S., 2014. Petrological and Paleontological Evidence for Generation of an Arc-back Arc System Within the Closing Southern Branch of Neotethys During the Late Cretaceous. Bull. Shk. Gjeol., Special Issue 2, 51-54.
  12. Ural, M., Arslan, M., Göncüoğlu, M.C., Tekin, U.K., Kürüm, S., 2015. Late Cretaceous Arc and Back-arc Formation Within the Southern Neotethys: Whole-rock, Trace Element and Sr-Nd-Pb Isotopic data from Basaltic Rocks of the Yüksekova Complex (Malatya-Elazığ, SE Turkey). Ofioliti, 40 (1).
  13. Perinçek, D., 1979a. Palu-Karabegan-Elazığ-Sivrice-Malatya Alanının Jeolojisi ve Petrol İmkanları, T.P.A.O., Ankara, Rap. No. 1361.
  14. Perinçek, D., 1979b. The Geology of Hazro-Korudağ-Çüngüş-Maden-Ergani-Hazar-Elazığ-Malatya Area, Guide Book, The Geological Society of Turkey, 33s.
  15. Naz, H., 1979. Elazığ-Palu Dolayının Jeolojisi, TPAO Raporu, 1360s.
  16. Perinçek, D., Özkaya, I., 1981. Arabistan Levhası Kuzey Kenarının Tektonik Evrimi, Yerbilimleri, 8, 91-101.
  17. Perinçek, D., Kozlu, H., 1984. Stratigraphy and Structural Relations of the Units in the Afsin-Elbistan-Dogansehir Region (Eastern Taurus). In: Tekeli, O., Göncüoğlu, M.C. (Eds.), Proceedings of International Symposium on the Geology of the Taurus Belt, 26-29 September, MTA, Ankara, Turkey, 181-198.
  18. Özkul, M., 1982. Güneyçayırı (Elazığ) Bölgesinin Sedimentolojisi. Yüksek Lisans Tezi, A.Ü. Fen Fak., 38, Ankara.
  19. Turan, M., 1984. Baskil-Aydınlar (Elazığ) Yöresinin Stratigrafisi ve Tektoniği. Doktora Tezi, F.U. Fen Bilimleri Enst., 180, Elazığ.
  20. Sungurlu, O., Perinçek, D., Kurt, G., Tuna, E., Dülger, S., Çelikdemir, E., Naz, H., 1985. Geology of the Elazığ-Hazar-Palu Area. Bulletin of the Turkish Association of Petroleum Geologists, 29, 83-191.

21. Akgül, M., 1987. Baskil (Elazığ) Granitoidinin Petrografik ve Petrolojik İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 60, Trabzon.
22. Akgül, M., 1991. Petrographic and Petrological Features of Baskil Granitoid (Elazığ), Geosound, 18, 67-78.
23. Akgül, B., 1993. Piran Köyü (Keban) Çevresindeki Magmatik Kayaçların Petrografik ve Petrolojik Özellikleri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 125, Elazığ.
24. Akgül, B., 2015. Geochemical Associations Between Fluorite Mineralization and A-type Shoshonitic Magmatism in the Keban–Elazığ Area, East Anatolia, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*, 111, 222-230.
25. Turan, M., Bingöl, A.F., 1991. Kovancılar-Baskil (Elazığ) Arası Bölgenin Tektono-stratigrafik Özellikleri., Ed. Yetiş, C., Ahmet Acar Jeoloji Sempozyumu, Bildiriler, Adana, 211-226.
26. Gürocak, Z., 1993. Sivrice (Elazığ) Çevresinin Jeolojisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 65, Elazığ.
27. Aksoy, E., Çelik, H., 1995. Kovancılar (Elazığ) Yakın Kuzey ve Batısının Jeolojik Özellikleri. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10(1), 11-19.
28. Ural, M., 2005. Çakmak Köyü (Keban) Çevresindeki Magmatic ve Kontak Metazomatik Kayaçların Petrografik ve Petrolojik İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniv., Fen Bilimleri Enst., 174.
29. Ural, M., 2012. Elazığ ve Malatya Çevresindeki Yüksekova Karmaşığı Bazik Volkanitlerinin Petrokimyası, Petrolojisi ve Yaşı. Doktora Tezi., Fırat Üniv., Fen Bilimleri Enst., 174.
30. Ural, M., Kürüm, S., 2009. Microscopic and Diffractometric Studies Inferred from Skarn Zonations Between the Keban Metamorphites and Elazığ Magmatites, Around Elazığ. *Turkish Journal of Science & Technology*, 4(2), 87-102.
31. Ural, M., Deniz, K., Sayit, K., 2019. Mafic Volcanic and Subvolcanic Rocks from the Yüksekova Complex in the İçme-Kesikköprü Province (East of Elazığ, Eastern Turkey): Whole-Rock Geochemistry and Confocal Raman Spectroscopy Characterization. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 362(1), 012122.
32. Ural, M., Sari, B., 2019. New Planktonic Foraminifera Data from the Upper Cretaceous Pelagic Limestones of the Yüksekova Complex in the Maden Area (Southeast of Elazığ, Eastern Turkey). In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 362(1), 012121.
33. Ural, M., Sari, M.K., 2019. Paleogeographic and Age Findings on Planktonic Foraminiferal Assemblages of Yüksekova Complex in the Northeast of Elazığ (Eastern Turkey). In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 362(1), 012146.
34. Bingöl, A.F., 1982. ELAZIĞ-PERTEK-KOVANCILAR ARASI VOLKANİK KAYAÇLARIN PETROLOJİSİ. Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 1, 9-21.
35. Bingöl, A.F., 1984. Geology of the Elazığ Area in the Eastern Taurus Region. In: Tekeli, O., Göncüoğlu, M.C. (Eds.), *Proceedings of International Symposium on the Geology of the Taurus Belt*, 26-29 September, MTA, 209-216, Ankara.
36. Bingöl, A.F., 1988. Petrographical and Petrological Features of the Intrusive Rocks of the Yüksekova Complex in the Elazığ Region (Eastern Taurus-Turkey). *Journal of Fırat University*, 3(2), 1-17.
37. Hempton, M., 1985. Structure and Deformation History of the Bitlis Suture Near Lake Hazar, SE Turkey, *Geological Society of America Bulletin*, 96, 223-243.
38. Aktas, G., Robertson, A.H.F., 1984. The Maden Complex, SE Turkey: Evolution of a Neotethyan Active Margin. In: Dixon, J.E., Robertson, A.H.F. (Eds.), *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*, Blackwell Scientific Publications, 375-402, Oxford.
39. Türkmen, İ., İnceöz, M., Aksoy, E., Kaya, M., 2001. Elazığ Yöresinin Eosen Stratigrafisi ve

- Paleocoğrafyası ile İlgili Yeni Bulgular. *Yerbilimleri*, 24, 81-95.
40. Çağlar, M.K., 2009. Benthic Foraminiferal Biostratigraphy of the Tertiary Sediments from the Elazığ and Malatya Basins, Eastern Turkey. *Journal of the Geological Society of India*, 74, 209-222.
41. Akkoca, D.B., Yıldırım, İ., Ertürk, M.A., 2018. First Data on the Geochemistry of Fluvial Deposits of Çaybağı and Palu Formations (Eastern Elazığ, Turkey). *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 527-537.
42. Türkmen, İ., Aksoy, E., Taşgin, C.K., 2007. Alluvial and Lacustrine Facies in an Extensional Basin: The Miocene of Malatya Basin, Eastern Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(1), 181-198.
43. Şengör, A.M.C., Yılmaz, Y., 1981. Tethyan Evolution of Turkey: A Plate Tectonic Approach, *Tectonophysics*, 75, 181-241.
44. Göncüoğlu, M.C., 2010. Introduction to the Geology of Turkey: Geodynamic Evolution of the Pre-alpine and Alpine Terranes, MTA Monographs Series, 66 (ISBN 978-605-4075-74, in Turkish).
45. Yazgan, E., 1984. Geodynamic Evolution of the Eastern Taurus Region (Malatya-Elazığ area, Turkey). In: Tekeli, O., Göncüoğlu, M.C. (Eds.), *International Symposium on the Geology of the Taurus Belt, Proceedings*, 26-29 September, MTA, 199-208, Ankara.
46. Yılmaz, Y., 1993. New Evidence and Model Evolution of the Southeast Anatolian Orogen. *Geological Society of America Bulletin*, 105, 251-271.
47. Yılmaz, Y., Yigitbas, E., Genc, S., 1993. Ophiolitic and Metamorphic Assemblages of Southeast Anatolia and Their Significance in the Geological Evolution of the Orogenic Belt. *Tectonics*, 12(5), 1280-1297.
48. Beyarslan, M., Bingöl, A.F., 2000. Petrology of a Supra-subduction Zone Ophiolite (Kömürhan-Elazığ-Turkey). *Canadian Journal of Earth Sciences* 37, 1411-1424.
49. Kılıç, A.D., 2005. Hazar Gölü (Sivrice-Elazığ) Güneyinin Petrografik ve Petrolojik Özellikleri. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 103, Elazığ.
50. Rizeli, M.E., Beyarslan, M., Wang, K.L., Bingöl, A.F., 2016. Mineral Chemistry and Petrology of Mantle Peridotites from the Guleman Ophiolite (SE Anatolia, Turkey): Evidence of a Forearc Setting. *Journal of African Earth Sciences*, 123, 392-402.
51. Ertürk, M.A., Beyarslan, M., Chung, S.L., Lin, T.H., 2018. Eocene Magmatism (Maden Complex) in the Southeast Anatolian Orogenic Belt: Magma Genesis and Tectonic Implications, *Geoscience Frontiers*, 9(6), 1829-1847.
52. Sar, A., Ertürk, M.A., Rizeli, M.E., 2019. Genesis of Late Cretaceous Intra-oceanic Arc Intrusions in the Pertek Area of Tunceli Province, Eastern Turkey, and Implications for the Geodynamic Evolution of the Southern Neo-Tethys: Results of Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical and Sr-Nd Isotopic Analyses. *Lithos*, 350, 105263.
53. Parlak, O., Rızaoğlu, T., Bağcı, U., Karaoğlan, F., Höck, V., 2009. Tectonic Significance of the Geochemistry and Petrology of Ophiolites in Southeast Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 473(1-2), 173-187.
54. Parlak, O., Karaoğlan, F., Rızaoğlu, T., Nurlu, N., Bağcı, U., Höck, V., Öztüfekçi Önal, A., Kürüm, S., Topak, Y., 2013. Petrology of the İspendere (Malatya) Ophiolite from the Southeast Anatolia: Implications for the Late Mesozoic Evolution of the Southern Neotethyan Ocean. *Geological Society, London, Special Publications* 372(1), 219-247.
55. Karaoğlan, F., Parlak, O., Klötzli, U., Koller, F., Rızaoğlu, T., 2013. Age and Duration of Intra-oceanic Arc Volcanism Built on a Suprasubduction Zone Type Oceanic Crust in Southern Neotethys, SE Anatolia. *Geoscience Frontiers*, 4(4), 399-408.
56. Aksoy, E., 1993. Elazığ Batı ve Güneyinin Genel Jeolojik Özellikleri. *Türk Yerbil. Derg.*, 1/1, 113-123.
57. Çelik, H., 2003. Mastar Dağı (Elazığ GD'su) Çevresinin Stratigrafik ve Tektonik Özellikleri. *Doktora tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 95.
58. Aksoy, E., Turan, M., Türkmen, İ., Özkul, M., 1996. Elazığ Havzasının Tersiyer'deki Evrimi. In: Korkmaz, S., Akçay, M. (Eds.), *KTÜ*

- Jeoloji Müh. Bölümü 30. Yıl Sempozyumu Bildirileri, 293-310, Trabzon.
59. Aksoy, E., Türkmen, İ., Turan M., 2005. Tectonics and Sedimentation in Convergent Margin Basins: An Example from the Tertiary Elazığ Basin, Eastern Turkey. *J Asian Earth Sci.*, 25, 459-472.
60. Köküm, M., İnceöz, M., 2018. Structural Analysis of the Northern Part of the East Anatolian Fault System, *Journal of Structural Geology*, 114, 55-63.
61. Özdemir, Y., 2016. Geochemistry of Tholeiitic to Alkaline Lavas from the East of Lake Van (Turkey): Implications for a Late Cretaceous Mature Supra-subduction Zone Environment. *Journal of African Earth Sciences*, 120, 77-88.
62. Celik, H., 2013. The Effects of Linear Coarse-grained Slope Channel Bodies on the Orientations of Fold Developments: A Case Study from the Middle Eocene-Lower Oligocene Kırkgeçit Formation, Elazığ, Eastern Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22 (2), 320-338.
63. MTA, 2002. Türkiye 1/500,000 ölçekli Jeoloji Haritası. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 18 pafta. Ankara.
64. Winchester, J.A., Floyd, P.A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Product Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.
65. Barrett, T.J., MacLean, W.H., 1999. Volcanic Sequences, Lithochemistry and Hydrothermal Alteration in Some Bimodal Volcanic-associated Massive Sulfide Systems, *Reviews in Economic Geology*, 8, 101-113.
66. Ross, P.S., Bedard, J.H., 2009. Magmatic Affinity of Modern and Ancient Subalkaline Volcanic Rocks Determined from Trace-element Discriminant Diagrams. *Canadian Journal of Earth Science*, 46, 823-839.
67. Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins*, Saunders, A.D., and Norry, M.J. (Eds.), Geological Society of London, 42, 313-345.
68. Pearce, J.A., 2008. Geochemical Fingerprinting of Oceanic Basalts with Applications to Ophiolite Classification and the Search for Archean Oceanic Crust. *Lithos*, 100, 14-48.

**Ek Çizelge 1.** Çalışılan kayaçların ana (%), iz (ppm) ve nadir toprak element (ppm) analiz verileri

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	LOI	Total
GO1	54,00	14,88	8,48	5,79	6,20	4,10	0,35	0,76	0,12	0,23	0,031	5,2	99,85
GO2	48,00	16,30	9,87	5,18	9,30	4,18	0,95	1,22	0,18	0,18	0,022	4,7	99,84
GO3	48,00	15,40	8,31	7,08	10,30	4,48	0,29	0,95	0,12	0,20	0,034	5,9	99,80
GO4	60,00	14,94	5,44	2,17	4,30	7,58	0,11	0,83	0,79	0,14	0,002	3,4	99,88
GO5	39,00	16,05	7,20	5,07	14,44	3,61	1,03	1,07	0,26	0,28	0,038	11,6	99,82
GO6	46,00	17,80	13,81	3,75	4,70	3,30	3,39	2,20	0,28	0,10	0,006	4,2	99,83
GO7	49,00	15,25	9,04	8,32	4,90	2,73	1,68	1,31	0,27	0,31	0,087	6,7	99,80
GO8	51,00	15,31	8,82	8,05	8,68	3,26	0,49	0,81	0,07	0,15	0,049	3,3	99,82
GO9	47,00	15,52	8,67	11,83	9,11	1,68	1,64	0,69	0,08	0,17	0,092	4,3	99,74
GO10	50,00	15,44	8,64	7,80	7,98	4,97	0,07	1,04	0,11	0,13	0,037	4,1	99,76
GO11	46,00	15,37	8,32	6,74	7,79	3,51	1,48	1,31	0,15	0,24	0,036	9,2	99,80
GO12	53,00	14,56	11,88	3,45	7,02	5,71	0,05	2,28	0,36	0,14	0,002	1,8	99,82
GO13	45,00	15,25	7,79	9,52	7,76	2,76	1,44	0,87	0,13	0,74	0,050	9,0	99,78
GO14	45,00	18,00	9,06	5,30	7,31	4,54	0,52	0,86	0,12	0,27	0,038	9,2	99,85
GO15	50,00	18,42	11,01	3,80	4,86	5,93	0,11	1,56	0,23	0,46	0,041	3,3	99,84
GO16	43,00	18,12	11,75	9,04	12,12	0,03	<0,01	1,33	0,15	0,16	0,005	4,6	99,75
GO17	65,00	15,17	6,02	0,58	2,66	7,91	0,05	0,77	0,44	0,10	0,003	1,2	99,94
GO18	48,00	18,56	8,78	11,59	2,00	3,62	0,70	1,06	0,19	0,80	0,019	5,1	99,73
GO19	52,00	14,48	8,81	7,70	8,85	2,72	0,38	0,91	0,09	0,14	0,043	4,0	99,78
GO20	52,00	14,73	8,83	8,58	5,59	2,38	0,84	0,79	0,10	0,16	0,034	6,1	99,78
GO21	49,00	15,24	8,06	6,50	14,87	1,62	0,02	0,81	0,12	0,17	0,039	4,1	99,79
GO22	45,00	16,59	8,46	5,93	11,91	3,93	0,53	1,36	0,28	0,23	0,050	9,0	99,78
GO23	46,00	16,05	10,56	4,93	12,06	4,41	0,00	1,07	0,09	0,30	0,092	8,1	99,81
GO24	47,00	12,34	6,25	2,60	18,70	3,14	0,05	0,60	0,08	0,11	0,040	9,4	99,89
GO25	46,00	13,28	7,21	5,43	14,70	3,98	0,04	0,72	0,09	0,10	0,047	8,4	99,84
GO26	55,00	12,64	8,14	5,74	12,10	2,18	0,06	0,69	0,06	0,13	0,066	3,6	99,81
GO27	48,00	13,94	7,49	5,44	14,96	3,15	0,06	0,84	0,13	0,12	0,047	5,6	99,80
GO28	51,00	15,77	9,29	7,25	5,38	5,67	0,02	1,14	0,09	0,17	0,026	4,2	99,83
GO29	46,00	12,96	8,24	4,76	14,47	3,30	0,30	0,90	0,11	0,14	0,039	9,3	99,87

Ek Çizelge 1. Devam

S,No	Ba	Hf	Nb	Rb	Sr	Th	V	Zr	Y	Sc	Ta	Cs	Ga	Ni
GO1	51	1,4	0,8	5,7	170,0	0,3	185	43,0	16,3	32	<0,1	0,3	10,8	86
GO2	46	2,0	0,9	17,9	164,1	0,2	230	64,0	26,3	40	<0,1	0,4	14,1	76
GO3	47	1,9	1,8	3,8	227,0	0,4	245	59,0	21,3	35	<0,1	0,2	12,4	79
GO4	23	3,1	5,8	1,2	155,1	2,6	309	113,0	44,9	18	0,4	<0,1	7,1	<20
GO5	69	2,7	9,0	13,5	160,8	1,8	365	97,0	20,4	25	0,6	0,7	13,7	172
GO6	79	3,9	3,0	45,7	119,0	0,7	345	127,0	43,8	45	0,2	1,1	18,4	41
GO7	73	2,7	3,4	20,8	93,0	0,5	162	78,0	19,2	33	0,3	0,8	10,2	185
GO8	42	1,4	0,8	7,1	121,0	0,2	239	42,0	17,8	34	<0,1	0,1	10,8	144
GO9	125	1,3	0,7	19,0	125,0	<0,2	211	35,0	14,6	39	<0,1	0,4	12,4	286
GO10	61	1,9	1,3	0,6	160,0	0,4	244	65,6	22,4	32	0,1	0,1	14,3	122
GO11	95	2,2	4,8	35,4	66,5	0,7	193	73,8	21,0	39	0,3	1,1	14,4	61
GO12	19	4,7	3,8	0,2	115,3	0,6	213	180,0	58,0	28	0,3	0,1	19,6	21
GO13	87	1,9	4,7	22,4	106,4	0,7	198	57,2	16,2	29	0,3	1,1	11,7	139
GO14	34	1,5	1,1	10,9	129,0	0,3	198	49,3	19,8	37	0,1	0,6	15,4	104
GO15	25	2,9	2,3	2,0	236,0	0,2	219	102,2	38,0	43	0,2	<0,1	16,3	79
GO16	<1	2,2	1,6	<0,1	175,0	0,6	312	81,3	30,0	45	0,1	<0,1	15,9	45
GO17	17	2,9	5,5	0,5	196,6	2,9	209	92,4	32,0	20	0,4	<0,1	6,6	<20
GO18	62	2,4	4,2	9,8	142,3	1,4	157	78,3	18,6	33	0,3	0,2	15,6	54
GO19	13	1,7	0,9	3,9	138,7	<0,2	249	50,7	22,9	34	<0,1	<0,1	12,9	92
GO20	24	1,4	0,8	9,6	96,5	<0,2	221	47,6	18,7	30	<0,1	0,1	13,4	90
GO21	5	1,8	1,5	<0,1	148,5	0,3	245	53,3	19,7	31	<0,1	<0,1	16,8	108
GO22	69	2,9	17,1	6,9	216,7	2,0	313	102,4	21,7	29	1,2	0,2	16,7	188
GO23	22	2,1	1,0	0,8	192,0	<0,2	260	70,6	26,3	36	<0,1	<0,1	16,4	409
GO1	51	1,4	0,8	5,7	170,0	0,3	185	43,0	16,3	32	<0,1	<0,1	14,1	95
GO24	8	1,2	0,9	0,4	58,7	0,2	223	37,8	13,4	25	<0,1	<0,1	11,7	130
GO25	17	1,4	0,9	0,2	63,6	<0,2	211	43,5	16,0	29	<0,1	<0,1	13,7	142
GO26	6	1,2	1,3	0,6	154,0	<0,2	244	42,8	17,8	30	<0,1	<0,1	15,2	126
GO27	19	1,8	1,9	0,4	294,6	0,3	218	63,0	22,4	32	<0,1	<0,1	13,7	55
GO28	9	1,9	0,9	0,1	76,5	<0,2	254	63,0	23,5	36	<0,1	<0,1	10,9	122
GO29	29	1,7	1,1	3,5	145,7	0,2	208	55,0	20,5	28	<0,1	<0,1	11,1	124

Ek Çizelge 1. Devam

S, No	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
GO1	4,1	7,7	1,37	5,9	1,93	0,76	2,39	0,44	2,81	0,59	1,73	0,27	1,67	0,23
GO2	2,9	8,4	1,42	7,6	2,65	1,12	3,53	0,72	4,60	0,99	2,90	0,43	2,78	0,42
GO3	4,2	10,2	1,61	7,9	2,52	0,90	3,01	0,61	3,75	0,81	2,17	0,35	2,30	0,35
GO4	15,3	31,0	4,91	21,6	4,91	1,46	5,36	0,96	6,12	1,43	4,56	0,73	5,03	0,82
GO5	10,8	24,0	3,16	13,7	3,24	1,12	3,33	0,60	3,51	0,77	2,22	0,32	2,06	0,30
GO6	7,4	17,7	3,21	16,0	5,27	1,89	6,63	1,28	8,10	1,68	4,90	0,70	4,15	0,67
GO7	3,0	6,6	1,24	6,9	2,27	0,77	2,88	0,58	3,70	0,80	2,37	0,37	2,21	0,33
GO8	2,3	6,2	1,08	5,3	1,96	0,82	2,54	0,50	3,05	0,69	2,00	0,31	1,89	0,28
GO9	1,9	5,6	0,91	4,8	1,58	0,67	2,08	0,40	2,80	0,58	1,64	0,26	1,44	0,23
GO10	3,31	10,0	1,57	8,2	2,32	0,95	3,41	0,62	3,73	0,82	2,30	0,36	2,32	0,34
GO11	5,81	14,4	2,02	9,0	2,58	0,87	3,42	0,61	3,60	0,78	2,12	0,32	2,17	0,31
GO12	7,61	25,0	3,99	21,2	6,41	2,07	8,79	1,60	9,61	2,10	6,11	0,90	5,62	0,87
GO13	5,9	13,6	1,94	8,7	2,27	0,78	2,51	0,49	3,11	0,65	1,83	0,27	1,61	0,27
GO14	2,91	7,3	1,24	6,0	2,17	0,76	2,93	0,53	3,44	0,72	2,17	0,33	2,11	0,30
GO15	7,3	14,4	2,66	13,3	3,82	1,42	5,11	1,00	6,31	1,36	3,96	0,57	3,63	0,52
GO16	5,2	14,4	2,29	11,2	3,23	1,22	4,03	0,81	4,91	1,10	3,11	0,50	3,11	0,46
GO17	13,0	25,4	3,68	15,3	3,91	1,17	4,23	0,75	4,86	1,05	3,11	0,50	3,23	0,51
GO18	9,5	20,4	2,78	12,5	2,79	0,96	3,03	0,57	3,59	0,73	2,13	0,32	2,12	0,32
GO19	2,7	7,1	1,26	7,3	2,30	0,89	3,08	0,58	3,70	0,80	2,35	0,37	2,26	0,36
GO20	3,0	8,1	1,29	6,4	2,09	0,81	2,64	0,51	3,03	0,74	1,90	0,29	1,86	0,27
GO21	3,4	8,5	1,42	7,2	2,20	0,77	2,82	0,51	3,11	0,72	2,11	0,32	2,02	0,31
GO22	10,1	23,3	3,19	14,5	3,38	1,12	3,66	0,62	3,68	0,80	2,24	0,34	2,09	0,31
GO23	2,5	7,9	1,44	7,3	2,51	0,99	3,51	0,66	3,87	0,88	2,60	0,39	2,36	0,37
GO1	4,1	7,7	1,37	5,9	1,93	0,76	2,39	0,44	2,81	0,59	1,73	0,27	1,67	0,23
GO24	2,4	6,7	1,05	5,2	1,53	0,55	1,93	0,37	2,18	0,48	1,38	0,23	1,35	0,20
GO25	2,2	5,9	1,01	5,1	1,66	0,61	2,22	0,42	2,67	0,56	1,76	0,27	1,68	0,27
GO26	2,3	6,7	1,13	6,1	1,91	0,91	2,51	0,49	2,85	0,64	1,91	0,31	1,70	0,28
GO27	4,3	11,1	1,70	8,8	2,46	0,89	3,26	0,58	3,54	0,79	2,17	0,33	2,12	0,34
GO28	2,8	8,5	1,47	8,1	2,41	0,98	3,25	0,67	4,23	0,91	2,68	0,39	2,50	0,39
GO29	3,3	8,6	1,38	7,1	2,17	0,81	2,80	0,55	3,63	0,76	2,13	0,33	2,16	0,30



## Madencilik Sektöründe İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetimi için Veri Entegrasyonu Uygulaması

Mustafa ERKAYAOĞLU\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara

Geliş tarihi: 04.02.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Madencilik endüstrisi, iş sağlığı ve güvenliği açısından değerlendirildiğinde, farklı mühendislik alanlarını ve bunlara bağlı riskleri kapsamaktadır. Günümüzde, teknoloji alanında yaşanan gelişmeler, madencilik endüstrisini mevcut donanım ve yazılımlar aracılığıyla, üretim, ekipmanların bakım/onarım durumu, maliyet, çevresel koşullar ve en önemlisi iş sağlığı ve güvenliği konusunda, veri toplayabilecek duruma getirmiştir. Bu çalışmada, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili farklı kaynaklardan elde edilen verilerin entegre edildiği bir uygulama sunulmaktadır. Veri entegrasyonu uygulamasında kullanılan, vaka çalışması sonucunda ekipman sağlığı ile ilgili güvensiz durum kayıtlarının, farklı ekipler ve taşıma işlemleri için incelenebileceği ortaya konmuştur. Özellikle vardiya başlangıçlarının, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili olayların yaşanabileceği bir zaman aralığı olduğu belirlenmiştir. Veri görselleştirme araçlarına rağmen, veri içerisinden sınırlı olup, günümüzde kullanılan bilgi görselleri ve modern görselleştirme araçlarına rağmen, veri içerisindeki yapılar karmaşık hale gelebilmektedir. Belirli olayların sebepleri incelenirken, veri madenciliği gibi daha sistematik yöntemlerin kullanılması önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Açık ocak madenciliği, Veri ambarı, Veri entegrasyonu, İş sağlığı ve güvenliği

### A Data Integration Application for Occupational Health and Safety Management in the Mining Industry

#### Abstract

Mining is an industry that covers various engineering disciplines and the related risks to them in terms of occupational health and safety. Recent technological improvements in available hardware and software solutions led the mining industry to be able to collect data related to productivity, machine maintenance, costs, environmental conditions, and most importantly, occupational health and safety. This study introduces a data integration application for analyzing safety related records by using multiple data sources. The case study presented in the study revealed that the unsafe events related to machine health could be analyzed for different operator crews based on haulage type. It is observed that the beginning of a shift is a potential duration where occupational health and safety related events occur. Patterns within data by visual interpretation have limited analytics capability and can become overwhelmingly complex, even with info-graphics and modern graphic tools. It is suggested to follow a systematic methodology such as data mining to find patterns for the causes of specific events.

**Keywords:** Surface mining, Data warehouse, Data integration, Occupational health and safety

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Mustafa ERKAYAOĞLU, emustafa@metu.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Madencilik endüstrisi, iş sağlığı ve güvenliği ile çeşitli mühendislik disiplinlerinin harmanlandığı ve bunlara ilişkin olası tüm riskleri kapsayan bir endüstridir. Çoğu sanayide ve süreçte olduğu gibi madencilik sektöründe yapılan iş sağlığı ve güvenliği yönetimi, ilgili süreçlerin, olayların ve risklerin sayısal olarak ölçülebilmesi temeline dayanmaktadır. Günümüzde, mevcut donanımlar ve kullanılan yazılımlardaki teknolojik gelişmeler, madencilik endüstrisinin verimlilik, ekipman sağlığı, maliyetler, çevre koşulları ve en önemlisi de iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili verileri toplayabilmesine imkan sağlamıştır.

Madencilikte yaygın olarak kullanılan veri toplama sistemleri, entegre sistemler olmamakla birlikte, farklı tiplerdeki verileri toplayabilme kapasitesine sahiptir ve genellikle sadece belirli amaçlar için bilgi sağlamaktadırlar. İş sağlığı ve güvenliği kavramı ise tüm süreçler ile ilgili ve ilişkili olduğu için operasyonel verileri toplayan sistemlerin ortak bir iş sağlığı ve güvenliği hedefi için bütünleştirilmesi gerekmektedir. Fakat tüm sisteme entegre olmaları ve daha ileri seviye analiz işlemleri yapabilmeleri için uygun bir altyapıya sahip olmaları önemlidir. Bazı araştırmacılar, iş sağlığı ve güvenliği yönetimi için veri entegrasyonu yöntemlerinden yararlanarak sistem altyapısının avantajlarını belirlemişlerdir [1,2]. Benzer altyapıya sahip veri sistemleri tarafından toplanan veriler, birbirlerinden tamamıyla bağımsız olarak değerlendirilemez. Bu duruma örnek olarak, ekipman sağlığı ile ilgili bilgilerin izlenmesi verilebilir. Ekipman sağlığının takibi, ekipmanın çalışma koşullarının izlendiği ve önceden belirlenmiş olan bir eşik değerini aşılması durumunda, alarmin devreye girmesi gibi bir dizi önlem kapsamaktadır. Bu sistem, normalde bakım planlama işlemlerini geliştirmek için kullanılmakta olup, ekipman operatörünün sürüş davranışlarını izlemek için de kullanılabilir. Bununla birlikte, bir operatörün, bir ekipmanı kullanması sırasında dikkatli veya art niyetli davranması da üretkenlik veya güvenlik kavramları üzerinde etkili olabilmektedir.

İş sağlığı ve güvenliği verileri, bu konudaki risklerin proaktif bir şekilde izlenmesini ve modellenmesini sağlayabilmektedir. Bu tip veriler, diğer veri kaynaklarıyla entegre olabilmekte ve risklerin verimli bir şekilde yönetilmesinde önemli bir rol oynamaktadırlar. İş sağlığı ve güvenliği verilerinin entegre olabileceği diğer veri kaynaklarına örnek olarak da güvenlik kültürü programı ölçütleri, eğitim geçmişi, operatör performansı ve ekipman sağlığı gibi konular verilebilmektedir. Veri setleri, hali hazırda mevcut olan çeşitli raporlama araçları ve/veya elektronik tablolar kümesi aracılığıyla, zaten kullanılabilir durumdadırlar. Aynı zamanda, kullanıcı tarafından elle yapılacak olan basit kopyala/yapıştır işlemleri ile elektronik tablolara entegre edilebilirler. Modern bilgi teknolojilerinden aldığı güç ile 'Büyük Veri' olarak isimlendirilen bu veri kaynakları, analiz ve modellemeyi kolaylaştırmak için özel olarak tasarlanmış tek bir ortama detaylı bir şekilde bütünleştirilebilir.

Uzmanlar, verileri bir arada daha kolay analiz edebilmek için yalnızca hedeflenen riske özgü veri setlerini değil, sahada mevcut tüm verileri raporlayarak ve değerlendirerek de iş sağlığı ve güvenliği risklerini tanımlayabilirler. Risk modellerinin geliştirilmesinin ardından veri akışları üzerinde gerçek zamanlı veri madenciliği uygulamaları geliştirilebilmektedir. Bu sayede gerçek zamanlı veya gerçek zamanlıya yakın bir şekilde iş sağlığı ve güvenliği ölçülmeye ve izlenmeye başlanabilmektedir.

Modern maden işletmelerinin iş sağlığı ve güvenliği verilerini entegre ve analiz etme yöntemlerindeki amaçları ve uygulamaları arasında ciddi farklılıklar vardır. Veri konsolidasyonu ve toplama işlemi, çoğu zaman birden fazla kaynaktan gelen verilerin aylık bölüm istatistiklerine göre toplanarak analiz edilmeden sadece rapor edildiği elektronik tablolarda gerçekleşir. Bu raporlar, veri işleminin bitiş noktası olmamakla birlikte, daha ileri analiz yöntemleri ve problemleri çözmeyi sağlayacak sorular sormanın bir yolu olarak değerlendirilmektedir.

Madencilik şirketlerindeki iş sağlığı ve güvenliği uzmanlarının çoğunluğu, veri madenciliği veya veri işleme konusunda uzman kişiler değildir. Esas görev tanımları gereğince, belirlenen yönergelere uyumluluğu denetlemek ve eğitim programları yoluyla, daha az kaza veya olay kaydı oluşmasını hedeflemektedirler.

Uzmanların incelediği iş sağlığı ve güvenliği veri kümelerinin çoğu, elektronik tablolar, MS Access veri tabanları veya kısmen de kurumsal kaynak yönetimi sistem verileri gibi çeşitli kaynaklarda depolanmaktadır. Madencilikte iş sağlığı ve güvenliği bölümü, ekipman kayıtları, gecikme kayıtları, verimlilik kayıtları, denetim kalitesi, bakım/onarım iş emirleri, eğitim kayıtları ve hatta çevresel dalgalanmalar gibi alternatif veri setlerine nadiren erişir veya bunları değerlendirir; çünkü bu kayıtlar diğer bölümler tarafından çoğu zaman veri tabanlarında toplanır ve farklı veri yapılarında saklanır.

Madenlerde karar verme rolüne sahip kullanıcıların tüm detayları içeren gerçek verilere ulaşması ve bu verileri veri madenciliği teknikleri ile değerlendirerek anlamlandırabilmeleri, halen daha araştırılmamış, iki çok önemli araştırma alanı ve konusudur. Maden verileri, hiçbir zaman tamamıyla erişime açık olmamakla birlikte, bu konuda çalışan araştırmacılarla nadiren paylaşılmaktadır. Ülkemizde çok az sayıda maden işletmesinde, çeşitli veri kaynaklarının hem geçmiş, hem de gerçek zamanlı veri akışları kullanılarak, birleştirilmesine veya incelenmesine izin veren bir veri altyapısı vardır. Veri madenciliğinde, bu amaçla kullanılan veri setinin yanı sıra, teknolojinin de derinlemesine anlaşılması gerekmektedir.

Günümüze kadar, büyük ölçekli veri madenciliği için geliştirilen çoğu uygulama ulusal güvenlik, çevrimiçi ticaret, havacılık [3] ve güncel olarak hasta merkezli sonuçlar için tıbbi verilere odaklanmıştır. Madenlerdeki iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili veriler ile yapılan veri madenciliği uygulamalarına odaklanan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Dessureault ve arkadaşları [4] madenlerdeki iş sağlığı ve güvenliği verileri üzerinde veri madenciliği uygulama potansiyelini araştırmak amacıyla ABD’de bulunan İş Sağlığı ve Güvenliği Ulusal Enstitüsü (NIOSH) veri seti üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, veri tabanının yapısını modernize ederek, veri tabanını gelişmiş analitik işlemler için kullanılabilir hale getirmek amacıyla, veri ambarı metodolojisi izlenmiştir. Ayrıca veri madenciliği için mevcut olan yazılımlar, çeşitli araştırmacılar tarafından iş kazalarının nedenlerini belirlemek amacıyla da kullanılmıştır [5-9]. Gerassis ve arkadaşları [10], yapay zekâ kullanarak, İspanya’daki madenlerde yaşanmış iş kazaları veri tabanını analiz etmiştir. Bu çalışmada, farklı iş kazaları için bilinmeyen ilişkilerin veri madenciliği teknikleri kullanılarak araştırılabileceği ifade edilmiştir. Madencilik endüstrisindeki diğer veri madenciliği uygulamaları ise operasyonel veriler [11], bakım [12], ekipman performansı, havalandırma [13] ve diğer alanlara odaklanmıştır.

İş sağlığı ve güvenliği yönetiminde, veri madenciliği tekniklerinden ve çeşitli kaynaklardan veri toplayan sistemlerden yararlanan yeni bir yaklaşıma ihtiyaç bulunmaktadır. Bu sistemler, çalışan, ekipman, saha durumları gibi koşulları izleyerek veri toplayabilmektedir. Madenciliğin gelişmiş olduğu ülkelerde, resmi kuruluşlar da veri toplama ve değerlendirme için izlenecek metodoloji/yol hakkında önerilerde bulunabilmektedir [14,15]. Herhangi bir veri entegrasyonu veya veri madenciliği uygulaması, öncelikle madencilik endüstrisindeki mevcut verilerin özelliklerinin iyi anlaşılmasını gerektirmektedir.

## 2. MADENCİLİKTE VERİ TİPLERİ

Madenlerdeki iş sağlığı ve güvenliği yönetimini daha güncel hale getirmek ve veri madenciliği uygulamalarına yönlendirmek için çeşitli yeniliklerin uygulanması gerekmektedir. Bu değişimi anlamak için endüstride kullanılan veri yapılarının türlerini anlamak gerekir. Bu veri yapısı türleri yapılandırılmış veriler, yanı

yapılandırılmış veriler ve yapılandırılmamış veriler olarak üç başlık altında incelenebilir.

### **2.1. İlişkisel Veri tabanları ve Veri Ambarı - Yapılandırılmış Veri**

İlişkisel veriler, veri tabanlarında depolanan tabloları kullanarak yapılan veri toplama sürecinin standart yoludur.

Bu veriler, madenlerde toplanan verilerin birçoğunu, özellikle de tüm geleneksel iş sağlığı ve güvenliğiyle birlikte üretim kayıtlarının da çoğunu kapsamaktadır. Bu veriler, son kullanıcı tarafından Microsoft (MS) Access, MS SQL Server veya SAP gibi, kurumsal sistemlerdeki elektronik tablolara ve ilişkisel veri tabanlarına aktarılır ve/veya depolanır. Bazı madencilik şirketleri, gerekli bilişim altyapısı yatırımlarını gerçekleştirerek, raporlama ve veri analizi çalışmaları için bütünlük bir sisteme bağlı tek bir veri tabanından yararlanabilmektedir. Bu sistem, birçok farklı kaynaktan gelen verileri entegre eden hem geçmiş verileri, hem de gerçek zamanlı verileri toplayan merkezi bir havuzdur. Bu tip veri ambarları aracılığıyla yapılan performans analizinin, geçmiş veriler için uygulanmasına “İş Zekâsı”, gerçek zamanlı veriler için uygulanması ise “Operasyonel Zekâ” olarak tanımlanmaktadır.

### **2.2. Süreç Verileri-Yarı Yapılandırılmış Veriler**

Hem kontrol etkileşimleri, hem de endüstriyel süreç boyunca koşullar, ilişkisel bir veri tabanına düzenli olarak örnekleme yoluyla veya Historian adı verilen, özel endüstriyel veri depolama araçları yoluyla kaydedilebilir ve saklanabilir. Süreç verileri veya endüstriyel veriler, genellikle gömülü sistemler olarak adlandırılan, gerçek zamanlı endüstriyel süreçlerden gelen sensör veya kontrol verilerinin toplanması ile elde edilmektedir. Programlanabilir Lojik Kontrolör (PLC), Veri Tabanlı Kontrol ve Gözetleme Sistemi (SCADA) endüstriyel süreci izleyen ve operatörler yardımı ile endüstriyel sistemleri kontrol eden ve takip eden bilgisayarlardır. Kontrol etkileşimleri ile beraber, süreç boyunca oluşan koşullar, ilişkisel bir veri tabanına düzenli olarak örnekleme yoluyla

veya Historian vasıtasıyla kaydedilebilir ve saklanabilir. Örneğin, yeraltı kömür madenlerinde, Karbon Monoksit sensörlerini, konveyör bantlarını, elektrik motorlarını ve diğer analog sinyalleri izlemek için farklı izleme sistemleri kullanılmaktadır. Bu sinyal ölçümleri, sanal etiketler altında kaydedilir. Örneğin, belirli bir konveyörün motorundan dakikada bir alınan amper değeri, etiketler altında kaydedilir. Verilerin bu süreç görünümüleri, gerçek zamanlı eğilimleri veya farklı nicel analog değişkenler arasındaki ilişkileri bulmak için uygun olmaktadır. Giderek daha da erişilebilir olan bu süreç verilerinden önemli bilgiler elde etmek mümkün olmaktadır. Örneğin, teknoloji ve onun sağladığı veriler sayesinde birbirine bağlı karmaşık sistemlerin ölçülmesi ve izlenmesini baz alan büyük ölçekli bir güç şebekesi için hem uzun vadeli, hem de kısa vadeli kararların verilebildiği gitgide büyüyen bir “akıllı şebeke” hareketinin oluşturulması sağlanabilmektedir.

Süreç verileri, ölçümün anlamının büyük bir kısmının etiketin/ölçümün detaylı açıklaması ile süreç içerisindeki önerileri içeren etiketin meta verileriyle ilgili olduğu durumda temel olarak etiketleme verileri olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, işlem verileri yalnızca kısmen yapılandırılmış veya yarı yapılandırılmış olarak değerlendirilebilir. Örneğin, konveyör motorundan okunan amper değeri tek bir etiket olmasına rağmen, bu etiket, maden işletmesinin belirli bir bölgesinde çalışan bir konveyörü temsil edilmektedir ve okunan amper değeri konveyör torkunu ifade ettiği için basit bir dönüşüm ile amper değeri, newtonmetre değerine çevrilerek konveyör hızı bulunabilmektedir.

### **2.3. Yapılandırılmamış Veriler**

Yapılandırılmamış veriler, büyük ölçüde sosyal medya ve web posta trafiği (Gmail gibi hizmet kullanıcıları) nedeniyle, en hızlı büyüyen veri biçimidir. Önceden tanımlanmış bir veri modeline sahip olmayan (ilişkisel bir modele kıyasla belirli bir veri tablosu ile özel olarak ilgili olmayan) veya önceden tanımlanmış bir formatta düzenlenmemiş bilgileri ifade eder. Yapılandırılmamış veriler, genellikle metinseldir, ancak tarihler veya sayısal

değerler gibi veri türlerini de içerebilmektedir. Yapılandırılmamış verilere örnek olarak; sağlık kayıtları, ses verileri, etiket için çok az meta verinin bulunduğu yerlerdeki analog veriler, resimler ve web sayfaları, e-posta veya iş sağlığı ve güvenliği olayı açıklaması gibi dokümanların gövdesinde bulunan metinler gösterilebilir. Bu veriler, çeşitli yapılarda olabilmektedir; örneğin, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili bir olayın açıklaması, kazaya karışan madencinin/operatörün ve ilgili ekipmanın adı, yaralanmanın niteliği ve ciddiyeti gibi yapılandırılmış verilerle birlikte, açıkça tanımlanmış kategorilere sahiplerdir. Yapılandırılmamış verilere bir başka örnek ise çevrim içi reklam veren yapılar olarak gösterilebilir. Bu altyapılar, potansiyel müşterileri tanımlamak için yapılandırılmamış verileri kullanırlar [16]. Diğer bir örnek ise gönderilen e-postaların taranarak içeriğinde bahsi geçen konularda göndericiye ve alıcıya uygun reklamlar sağlanmasıdır. Bu şekilde yapılan metin madenciliği sayesinde, bir güvenlik olayı veya iş emri, yeni kategoriler veya ilişkiler tanımlanabilmektedir.

İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili konularda, veri madenciliği uygulamak için aşağıda sıralanan kaynaklardan alınan veriler kullanılabilir.

### **İş Sağlığı ve Güvenliği & Eğitim**

- İş sağlığı ve güvenliği olayı: olayın gerçekleştiği zaman, yer, operatör, bölüm, makina, vb. veriler
- İş sağlığı ve güvenliği olayı incelemesi: tam metin açıklama, zaman, yer, operatör, bölüm, makina, vb. veriler
- İş sağlığı ve güvenliği olayı ile alakalı yapılan faaliyetlerin izlenmesi
- Yaralanmalar nedeniyle oluşan sağlık kayıtları ve maliyetler (kişisel verileri koruma yönergeleri kapsamında gizli tutulmak durumundadır)
- İhlaller, hem resmi, hem de dâhili kayıtlar
- Eğitim kayıtları

### **Ekipman Bakım-Onarım & Maliyetler**

- Detaylı arıza raporları
- Muhasebe sistemi kayıtları (kurumsal sistem); tüm iş emri maliyetleri ve iş emri açıklaması da

dâhil olmak üzere detaylar (özellikle hasar bilgisi eklenirken önemlidir).

- Ekipman sağlık verileri, ekipman alarmları, özel uyarılar ve geçmiş analog sinyaller kayıtları

### **Güvenlik Kültürü**

- İş yeri denetim kayıtları
- Güvenlik teşviklerine bağlılık / uyum
- İş gözlem kayıtları: açıklamalar, takip eylemleri
- Dijital süpervizör kontrol listeleri ve ‘vardiya geçişi’ raporları (not: bilinen riskler, vardiya geçişinde genellikle bir vardiyadan diğerine iletilir).
- Yorgunluk izleme sistemi: göz izleme kamera sistemleri, geçerli dikkat dağıtıcı sürücü olayları, yanlış pozitifler, vb.

### **Üretim**

- Saatlik çalışanların işe başlama ve işi bitiriş zamanlarının yer aldığı kartlarda bulunan RFID tabanlı sistemin bir parçası olan sanal delikli kart verileri
- Maden İzleme Sistemleri: tüm yeraltı ekipmanlarını (konveyör, vinç, fanlar) ve sensör kayıtlarını (Karbon Monoksit monitörleri) içeren işlem verileri
- Çeşitli üretim izleme sistemlerinden elde edilen tüm üretim kayıtları
- Her günün her saatini hesaba katan üretim bilgileri ve makinanın ne yaptığını içeren durum kodları ile birlikte kamyon/kepçe sevk sistemleri gibi ilişkisel sistemler de dâhil olmak üzere çeşitli üretim izleme sistemlerindeki tüm üretim kayıtları
- Dozer, çekme kepçe (dragline) ve delici ekipman izleme dâhil olmak üzere, yüksek hassasiyetli GPS izleme sistem verileri. Bu sistem verileri, aynı zamanda operatör becerisi ve titizliği hakkında da bilgi verebilir.
- Elle tutulan vardiya tabanlı üretim ve gecikme kayıtları
- Operatör, konum (GPS), alarm sırasındaki durum ve aktivite gibi bilgiler dâhil olmak üzere makina sağlığı alarmları

Tüm sonuçlar analiz edilirken operatörlerin, maden işletmelerinin ve şirket bilgilerinin gizliliği korunmalıdır. Tüm ana ekipmanlar, birden fazla

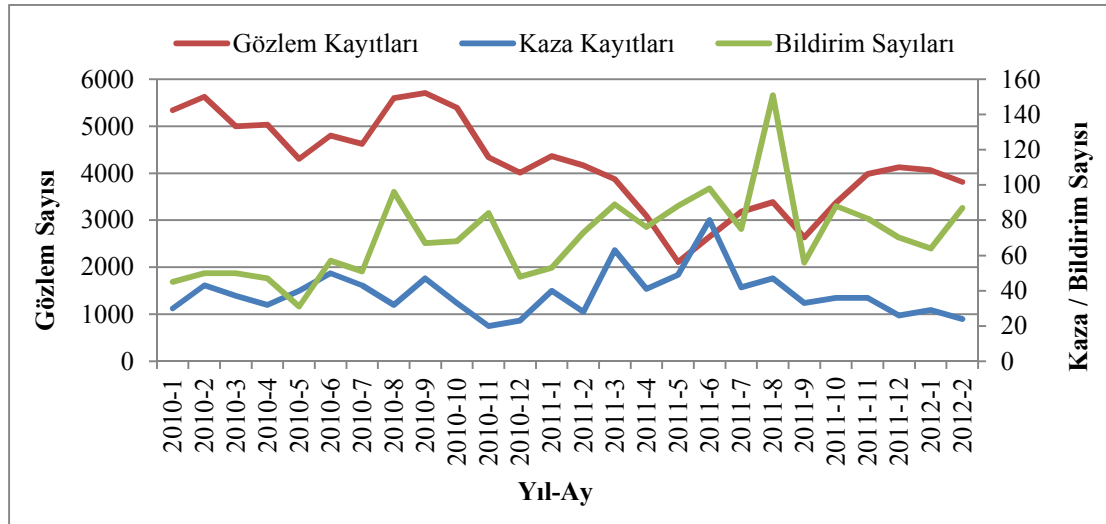
sistem tarafından izlenebilir. Her saniye hesaba katıldığı ve GPS hareketleri izlendiği için çeşitli sistemlerde toplu olarak saatlik yüzlerce kayıt üretilebilir. Veri kümelerinin potansiyel olarak entegre edilebilmesi amacıyla belirlenebildiği, entegre edilebildiği ve veri madenciliğine hazır hale getirebildiği ortak bir özellikler grubu oluşturmak için veriler mümkün olduğunda kurumsal veri ambarının bir parçası olarak sunulmalıdır.

### 3. VERİ ENTEGRASYONU UYGULAMASI

Modern maden işletmeleri, sahada çalışan ekipmanlar hakkında detaylı veri toplayabilecek sistemlerle donatılmaktadır. Rogers ve arkadaşları [17], çalışmalarında maden işletmelerinin günümüzde nesnelere interneti, iş zekâsı ve mobil cihazlarla bilgi işleme gibi alanlar için geliştirilen sistemlere yatırım yapmaları gerektiğini belirtmiştir. Bu sistemlerin etkin şekilde çalışması için güvenilir ve esnek bir veri altyapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Maden işletmelerinde, sistematik veri altyapısına ihtiyaç duyulan birçok alan bulunur. Haas ve arkadaşları [18], maden işletmelerinin iş sağlığı ve güvenliği politikalarında tanımlanan amaç ve hedefler doğrultusunda hangi iletişim araçlarının

kullanıldığını araştırmıştır. Şirketlerin kurumsal karne uygulamalarında, öncü ve gecikmeli göstergeleri birlikte kullanarak iş güvenliği yönetimini en etkin şekilde kullanmaları önerilmektedir. Chunmin ve arkadaşları [19], dijital maden olarak tanımladıkları geleceğin madeni konsepti için veri, işlem ve uygulama olarak ayrı seviyelerden oluşan katmanlı bir altyapı önermiştir. Bu altyapıya veri sağlayan dağınık veri kaynaklarından güvenilir sonuçlar elde edilmesi için en önemli unsurun veri entegrasyonu olduğu vurgulanmıştır. Veri entegrasyonunun madencilik faaliyetlerinde karar verme sürecine destek olarak kullanılabilmesini belirten Kahraman ve Dessureault [20], geliştirilen uygulamaların süreç değişimi ile uyumlu şekilde uygulanması gerektiğine dikkat çekmiştir.

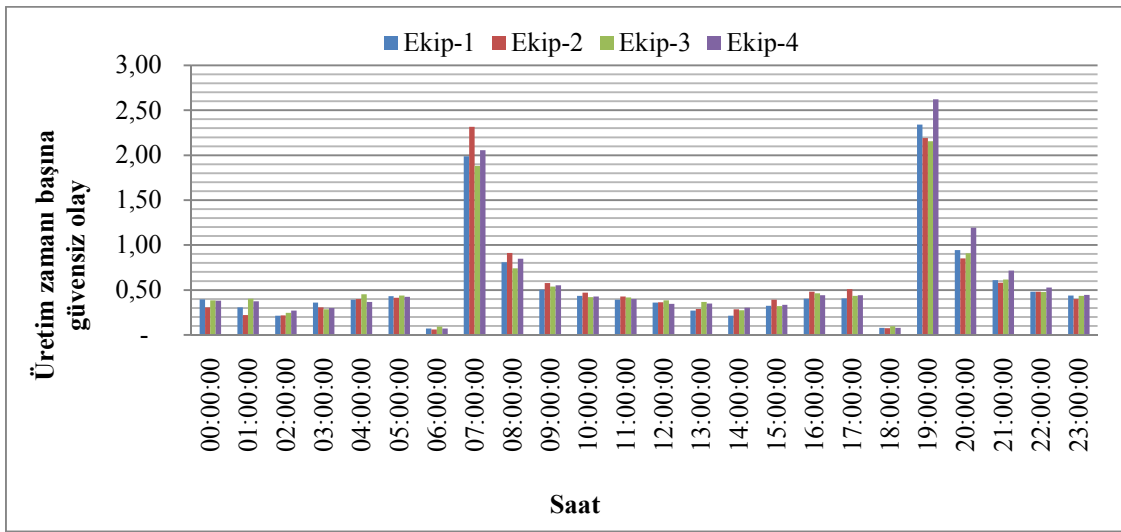
Bu çalışma kapsamında yürütülen veri entegrasyonu uygulamasında, ABD’de bulunan bir açık ocak kömür madeninde gerçekleşen güvenli olmayan durum kayıtlarından yararlanılmıştır. Uygulamada 3 farklı veri kaynağı MS SQL Server yazılımları kullanılarak entegre edilip görselleştirilerek farklı örüntüler araştırılmıştır. Şekil 1’de, maden işletmesinin kullandığı iş sağlığı ve güvenliği yönetim sisteminde bulunan veriler özetlenmiştir.



Şekil 1. İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemindeki kayıtların dağılımı

MS SQL Server yazılımı bir veri tabanı yönetim sistemi olmakla birlikte raporlama ve analiz amacıyla kullanılabilen ek özelliklere sahiptir [21]. Çalışmada yürütülen veri analizi ve veri madenciliği uygulamaları, MS SQL Server Analysis Services (SSAS) kullanılarak tamamlanmıştır. Veri analizi için kullanılan temel araç OLAP küpleridir ve bütünleşik şekilde veriyi çok boyutlu olarak incelemeye yarayan bu araçlara MS Excel aracılığıyla Pivot tabloları olarak erişim sağlamak mümkündür [22]. Yaklaşık iki yıllık bir süre zarfında kayıt altına alınan, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili gözlem, kaza ve bildirim sayıları incelendiğinde belirli dönemlerde daha detaylı incelenmesi gereken durumların gerçekleştiği görülmektedir. Ancak bu veriyi, yılın ayları olarak tanımlanan bir zaman çözünürlüğünde başka bir veri sistemi ile entegre etmeden anlamlandırmak mümkün olmamaktadır.

Yararlanılan veri kaynaklarından olan filo yönetim sistemi, işletmede kullanılan ekipmanların üretim sırasında geçen sürelerini çalışan ekipler, ekipmanlar ve farklı zaman aralıkları için sağlayabilmektedir. Bu sistem tarafından kaydedilen veri, ilişkisel niteliktedir ve çok miktarda detaylı ekipman bilgisi içerir. Filo yönetim sisteminin verisi, kayıt aralığı ve nitelik olarak değerlendirildiğinde, hem gerçek zamanlı, hem de geçmişe dönük şekilde farklı uygulamalar aracılığıyla kullanılabilir. Bu veriye entegre edilen diğer bir veri kaynağı, ekipman sağlığı sistemi kayıtları olmuştur. Ekipmanların kullandıkları süre boyunca, gerçekleşen güvensiz olay ve durumlar, zaman ve operatör gibi farklı veri boyutlarında Şekil 2’de görüldüğü üzere, analiz edilebilmektedir.



Şekil 2. Üretime elverişli zamana göre güvensiz olay dağılımı

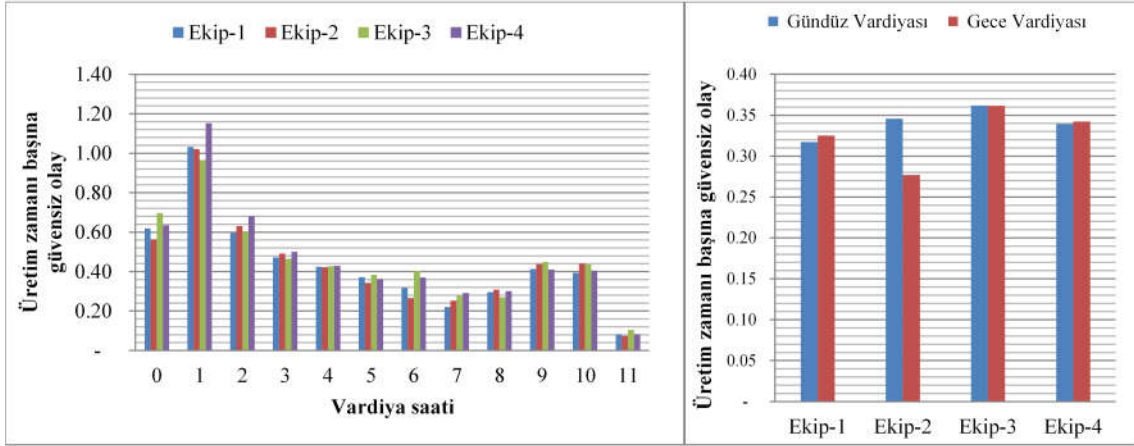
Şekil 2’de görüldüğü üzere, maden ekipmanlarının kullanımı sırasında, kayıt altına alınan güvensiz durumlar, ekipmanın hazır olduğu süre aralığında farklı ekipler için incelenmiştir. Günün özellikle işe başlangıç ve vardiya değişimi olan 7:00 ve 19:00 saatlerinde, daha fazla sayıda güvensiz olay kaydedildiği görülmektedir. Vardiya değişimi sırasında yoğunlaşan güvensiz durumların, işletmenin aralıksız olarak üretimde bulunması ile ilişkili olduğu düşünülmüştür. Durumu daha

detaylı şekilde incelemek ve anlamlandırmak amacıyla, veri entegrasyonundan yararlanılmıştır. Vardiya saatleri veri analiz boyutu olarak kullanıldığında, Şekil 3’te görülen dağılım belirlenmiştir.

Güvensiz durumların tüm ekipler için en sık gözlemlendiği zaman aralıkları incelendiğinde, vardiyanın ilk saatlerinde daha fazla kayıt bulunduğu ortaya çıkmıştır. Bu durumun

nedenin ise tüm operatörler için vardiya başlangıcında yaşanan konsantrasyon ve koordinasyon eksikliği olduğu düşünülmektedir. Ancak Ekip-2 için çalışan operatörlerin ilişkilendirildiği güvensiz durumlar daha detaylı olarak incelendiğinde, gündüz vardiyası süresince

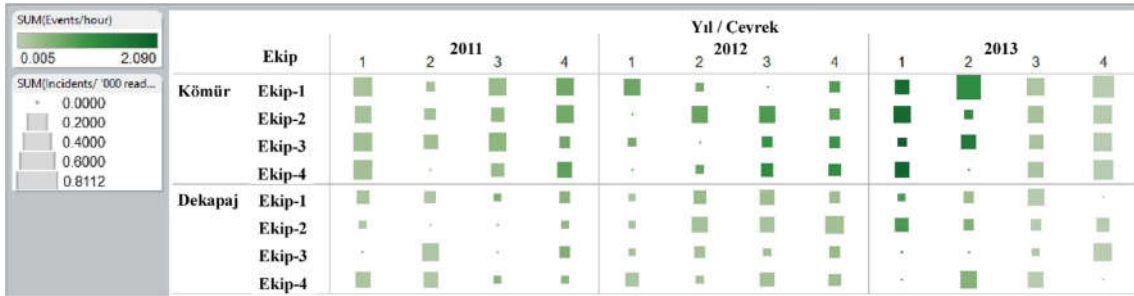
kayıt edilen daha fazla sayıda durum olduğu tespit edilmiştir. Bu tespit, derinlemesine analiz gerektiren durumlara bir örnek teşkil etmektedir ve sadece veri görselleştirme araçlarından yararlanılarak derinlemesine analiz yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3. Vardiya başına üretime elverişli zamana göre güvensiz olay dağılımı

Veri entegrasyonunun sağlandığı altyapılarda, derinlemesine analiz yapılabilmesi için detaydan özete çalışabilecek daha fazla boyut tanımlanması gerekmektedir. Veriyi inceleyerek anlamlandırmaya çalışan mühendisler, entegre edilmiş veriyi görselleştirme sonucu ortaya çıkan

karmaşık bilgi karşısında doğru kararlar veremeyebilirler. Bu nedenle, veri madenciliği gibi ileri analiz araçlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 4'te temsil edildiği üzere, mevcut veri daha fazla veri boyutu ve ölçütten yararlanılarak incelenmelidir.



Şekil 4. Çoklu veri boyutları ile incelenen güvensiz durum kayıtları

Ekipler ile ilişkilendirilen güvensiz durumlar incelendiğinde, hangi ekipman ile malzeme taşındığı, kömür üretimi ya da dekapaj işlemi yapıldığı gibi ek bilgiler, yapılan analizlerden çıkarılan sonuçları, daha kapsamlı hale getirmektedir. Farklı veri sağlayan sistemleri entegre etme sırasında kullanılan mevcut veri

boyutları, veriyi zaman gibi ortak bileşenler üzerinde küçük parçalara ayırarak, analiz yapabilme olanağı sağlamaktadır. Ekip-1 için kaydedilen güvensiz durumların 2013 kayıtları daha detaylı incelenmek istendiğinde, özellikle kömür üretimi ile ilgili olan veri boyutları eklenerek, entegre veri seti daha etkin şekilde



incelenebilmektedir. Örnek olarak sunulan durumlardan birisi, üretime hazır süre içerisinde her ekip ve üretim/dekapaj işlemine göre normalize edilmiş ekipman sağlığı kayıtlarıdır. Bu tür çok boyutlu bir verinin, sistematik bir yaklaşım olmadan, sağlıklı şekilde incelenmesi mümkün olmayacaktır. Modern maden işletmelerinde kullanılan sistemler göz önünde bulundurulduğunda, veri madenciliği gibi araçlar kullanılmadan anlamlandırılmayacak kadar çok boyutlu ve karmaşık veri setleri bulunmaktadır. Karar verme sürecinde kritik role sahip olan mühendislerin, veri toplama ve raporlama yerine uygun araçlar sağlanarak veri analizine odaklanmaları önerilmektedir.

#### 4. SONUÇ

Verilerin analizi, modern madenlerde karar verme aşamalarının ve yönetimin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Güvenlik ve üretim gibi farklı veri kaynaklarının entegrasyonu sayesinde, mühendisler karmaşık ilişkileri kolayca araştırabilir duruma gelmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, madencilik endüstrisinde mevcut olan farklı veri türlerini göstermek ve veri entegrasyonunun bir uygulamasını tanıtmaktır. ABD’de bir kömür madeninden alınan iş sağlığı ve güvenliği ve üretim koşulları ile ilgili veriler zaman, vardiya zamanı, vardiya, tarihler, çalışanlar ve ekipman tipi olmak üzere altı farklı kategoride incelenmiştir. Operatörler için kaydedilen güvenli olmayan olay sayısının, vardiyaların başlangıç zamanlarında meydana gelme olasılığının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun nedeni, çeşitli durumlardan dolayı oluşmuş olan konsantrasyon eksikliği olarak yorumlanmıştır. Bir ön veri madenciliği uygulaması, ekipman sağlığına ilişkin güvenli olmayan olayların, taşıma türüne göre farklı operatör ekipleri için analiz edilebileceğini ortaya koymuştur. Modern grafik araçları ile bile karmaşık hale gelebilen veriler arasındaki bağlantıları, korelasyonları ve düzenli oluşan kalıpları görsel olarak bulmak için ciddi bir analitik yeteneğe sahip olmak gereklidir. Bu bahsedilen kalıpları bulmak için veri madenciliği gibi daha sistematik bir metodolojiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle iş sağlığı ve güvenliği yönetimi ve risk modellemesinde başlatılması

gereken en büyük yenilik, veri madenciliği kullanılarak güvenli olmayan veri kaynaklarından entegre veri setleri oluşturmaktır. Madencilik ekipmanlarından toplanan veriler, nesnelere internetinin (IoT), piyasaya sürülmesiyle daha erişilebilir olmaya başlamış olup, sektörü daha verimli veri toplama ve kullanma yönünde yönlendirmektedir. Verilerin kullanımı, modern madenciliğin kaçınılmaz bir bileşenidir ve bu alanda maden mühendislerinin eğitilmesi şarttır.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Kolonja, L., Stanković, R., Obradović, I., Kitanović, O., Stevanovic, D., Radojicic, M., 2016. A Business Intelligence Approach to Mine Safety Management. 13<sup>th</sup> ISCSM 2016 Belgrade, 1-9.
2. Bonsu, J., van Dyk, W., Franzidis, J-P, Petersen, F., Isafiade, A., 2016. A Systems Approach to Mining Safety: An Application of the Swiss Cheese Model. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 116(8), 776-784.
3. Shi D., Guan J., Zurada J., Manikas A., 2017. A Data-Mining Approach to Identification of Risk Factors in Safety Management Systems, Journal of Management Information Systems, 34:4, 1054-1081.
4. Dessureault, S., Sinuhaji, A., Coleman, P., 2007. Data Mining Mine Safety Data, Mining Engineering, 59(8), 64-70.
5. Sanmiquel, L., Rossell, J.M., Vintro, C., 2015. Study of Spanish Mining Accidents Using Data Mining Techniques, Safety Science, 75, 49-55.
6. Sanmiquel, L., Bascompta, M., Rossell, J.M., Anticoi, H.F., Guash, E., 2018. Analysis of Occupational Accidents in Underground and Surface Mining in Spain Using Data-Mining Techniques. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15, 462, 1-11.
7. Ruso, J., Stojanović, V., 2012. Occupational Health and Safety Using Data Mining. International Journal for Quality Research, 6(4), 355-363.
8. Cheng, C., Leu, S., Cheng, Y., Wu, T., Lin, C., 2012. Applying Data Mining Techniques to Explore Factors Contributing to Occupational

- Injuries in Taiwan's Construction Industry, *Accident Analysis & Prevention*, 48, 214-222.
9. Kniesner, T.J., Leeth, J.D., 2004. Data Mining Mining Data: MSHA Enforcement Efforts, Underground Coal Mine Safety, and New Health Policy Implications. *Journal of Risk and Uncertainty*, 29(2), 83-111.
  10. Gerassis, S., Saavedra, Á., Taboada, J., Alonso, E., Bastante, F.G., 2019. Differentiating Between Fatal and Non-fatal Mining Accidents Using Artificial Intelligence Techniques. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1-13.
  11. Erkayaoğlu, M., Dessureault, S., 2019. Improving Mine-to-mill by Data Warehousing and Data Mining, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 33:6, 409-424.
  12. Dindarloo, S.R.R., Siami-Irdemoosa, E., 2017. Data Mining in Mining Engineering: Results of Classification and Clustering of Shovels Failures Data. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 31(2), 105-118.
  13. Jianwei, C., Shengqiang, Y., 2012. Data Mining Applications in Evaluating Mine Ventilation System, *Safety Science*, 50(4), 918-922.
  14. Vaught, C., Mallett, L., Brnich, Jr., M.J., Reinke, D., Kowalski-Trakofler, K.M., Cole, H.P., 2006. Knowledge Management and Transfer for Mine Emergency Response. *International Journal of Emergency Management*, 3(2/3), 178-191.
  15. Queensland Mine Safety Framework, <https://www.dnrme.qld.gov.au/mining-resources/initiatives/qld-mine-safety-framework> (Erişim Tarihi: Şubat, 2020)
  16. Liu, J., 2019. Using Big Data Database to Construct New GFuzzy Text Mining and Decision Algorithm for Targeting and Classifying Customers. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 1088-1095.
  17. Rogers, W.P., Nelson, M.G., Richins, A., Hodgson, A., 2017. Data Management Best Practices of Complex Socio-technical Systems: A Review of U.S. Mining Safety and Health Management. *Proceedings of the 8th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry*, 83-87.
  18. Haas, E.J., Ryan, M., Willmer, D.R., 2018. An Examination of Mining Companies' Online Health and Safety Policies: Implications for Improving Risk Management. *Journal of Safety, Health, Environmental Research*. 14(1), 337-347.
  19. Chunmin L., Xin Z., Xin L., 2012. Mine Safety. *Information Technology in the Framework of Digital Mine*, *Safety Science*, 50(4), 846-850.
  20. Kahraman, M.M., Dessureault, S., 2018. Increasing Adherence to Mine Plan Through Data Integration and Process Change, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 32(5), 341-354.
  21. Microsoft SQL Server, 2019, <https://www.microsoft.com/tr-tr/sql-server/sql-server-2019> (Erişim Tarihi: Şubat, 2020)
  22. Çetinyokuş, T., Gökçen, H., 2008. Bütünleşik Veri Kütüphanesi Sistemi (Bvks): Satış Kütüphanesi Uygulaması. *Gazi University Journal of Engineering and Architecture*, 23(2), 477-484.

## Doğal Bir Madde Olan Nişastadan Aktif Karbon Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Adsorbent Olarak Kullanımı

Ömer KAZAK<sup>\*1,2</sup>

<sup>1</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü,  
Konya

<sup>2</sup>Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİTAM), Konya

Geliş tarihi: 31.07.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Bu çalışmada, doğal bir madde olan nişastadan kimyasal aktivasyon yöntemi ile aktif karbon hazırlanmıştır. Nişastanın hidrotermal karbonizasyonu sonucu karbon kürecikler elde edilmiştir. Kimyasal aktivasyon işlemi 800 °C'de NaOH ile gerçekleştirilmiştir. Kimyasal aktivasyonun karbon küreciklerin yapısı ve morfolojisi üzerine etkileri FT-IR, SEM ve BET ve zeta potansiyeli teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Aktivasyon işlemi sonucunda, yüksek spesifik yüzey alanına (968 m<sup>2</sup>/g) sahip mikro gözenekli (0,592 cm<sup>3</sup>/g) aktif karbon elde edilmiştir. Aktif karbonun sudaki kongo kırmızısının giderimini de adsorbent olarak kullanılma potansiyeli farklı deneysel şartlar altında araştırılmıştır. Aktif karbonun kongo kırmızısı için Langmuir adsorpsiyon kapasitesi 117,65 mg/g'dir. Rejenarasyon çalışmaları aktif karbonun adsorpsiyon kapasitesinde bir değişiklik olmadan kongo kırmızısı giderimi için en az altı kez kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrotermal karbonizasyon, Aktif karbon, Kongo kırmızısı, Adsorpsiyon

## Preparation of Activated Carbon from Natural Starch, its Characterization and Use as an Adsorbent

### Abstract

In this study, activated carbon was prepared from starch which is a natural substance by chemical activation method. Carbon spheres were obtained by hydrothermal carbonization of starch. Chemical activation process was carried out with NaOH at 800 °C. The effects of chemical activation on the structure and morphology of carbon spheres were evaluated using FT-IR, SEM and BET and zeta potential techniques. As a result of the activation process, the activated carbon having microporous (0,592 cm<sup>3</sup>/g) with high specific surface area (968 m<sup>2</sup>/g) was obtained. The potential of using activated carbon as an adsorbent for removal of congo red in water was investigated under several experimental conditions. Langmuir adsorption capacity of active carbon for congo red is 117,65 mg/g. Regeneration studies have shown that the activated carbon can also be used at least six times for the removal of congo red with no change in its adsorption capacity.

**Keywords:** Hydrothermal carbonization, Activated carbon, Congo red, Adsorption

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ömer KAZAK, [okazak@erbakan.edu.tr](mailto:okazak@erbakan.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Boyar maddeler tekstil, kâğıt, lastik, deri, yiyecek vb. çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Boyar madde içeren endüstriyel atık suların akarsu, göl, deniz ve diğer alıcı ortamlara deşarj edilmesi önemli bir çevre sorunu oluşturmakta ve boyar maddelerin birçoğu sudaki yaşamın yanı sıra insanlar için kanserojen ve mutajen özelliklere sahiptir [2]. Bu sebeplerden dolayı boyar madde içeren endüstriyel atık sular alıcı ortama deşarj edilmeden önce arıtılmalıdır.

Boyar madde içeren atık suların arıtımı için kimyasal oksidasyon, elektrokoagülasyon [3], nano filtrasyon [4], ters ozmoz ve adsorpsiyon [5] gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında, adsorpsiyon uygulama kolaylığı ve yüksek verimliliğe sahip olması nedeni ile su ortamından boyar maddelerin gideriminin de en uygun ve etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir [6,7]. Boyar madde içeren atık suların adsorpsiyon yöntemi ile arıtımına yönelik son yıllardaki çalışmalar, verimli, ucuz ve yenilenebilir adsorbent malzemelerin kolay ve çevre dostu tekniklerle hazırlanmasına odaklanmıştır [8]. Hidrotermal karbonizasyon (HTC) işlemi düşük işletme maliyeti ve organik çözücü kullanılmaması gibi avantajları, HTC işleminin karbon esaslı adsorbentlerin hazırlanması için düşük maliyet ve çevreye zararsız yöntem olarak değerlendirilmektedir [9]. Karbon malzemelerin hazırlanmasında geliştirilen bu yöntemin önemi göz önüne alındığında HTC alternatif bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. HTC yöntemi ile elde edilen karbon esaslı malzemeler fiziksel veya kimyasal yöntemlerle adsorpsiyon kapasitesi büyük, geniş yüzey alanına sahip aktif karbonların üretimi önem taşımaktadır. HTC yöntem ile hazırlanmış karbon esaslı malzemeler, yüzey alanını ve adsorbentin giderim performansını artırmak için farklı aktivasyon reaktifleri (KOH, NaOH, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ile kimyasal yöntemle aktive edilirler [10].

Bu çalışmada, yenilenebilir, doğal, ucuz bir madde olan nişasta, HTC tekniği ile karbon esaslı karbon kürecikler elde edilmesi için tercih edilmiştir. Elde

edilen karbon kürecikler NaOH ile kimyasal olarak aktive edilerek aktif karbon hazırlanması hedeflenmiştir. Ürünlerin yapısal ve morfolojik özellikleri termal gravimetrik analiz (TGA), taramalı elektron mikroskobu (SEM), fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), Brunauer, Emmet ve Teller (BET) teknikleri yanında, gözenek boyut dağılımı-boşluk hacmi ve zeta potansiyeli analizleri ile incelenmiştir. Aktif karbonun su ortamındaki model organik kirletici (kongo kırmızısı) adsorpsiyonunda kullanılabilir potansiyelinin araştırılması amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kullanılan Kimyasallar

Deneyisel çalışmalarda kullanılan kimyasallar analitik saflıktadır. Patates nişastası (25 °C'de 20 g/L H<sub>2</sub>O'da pH değeri 6-7,5, 50 g/L çözünürlüğe sahip) NaOH, HCl, NaCl, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> Merck firmasından, kongo kırmızısı Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir.

### 2.2. HTC Yöntemi ile Karbon Küreciklerin Hazırlanması

Nişasta önceki çalışmalarımızda açıklandığı şekilde HTC yöntemi ile karbon küreciklere dönüştürülmüştür [11]. Bu yöntemle göre, 1 g nişasta 20 mL saf suda 30 dakika manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra 10 mL, 0,5 mM (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>Fe(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> ilave edilerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. 50 mL kapasiteye sahip teflon kaplı basınca dayanıklı paslanmaz çelik otaklav içerisine konulmuş ve 180 °C'de 12 saat bekletilmiştir. Elde edilen karbon kürecikler saf su ile yıkayıp 100 °C'de kurutulmuştur. HTC yöntem ile aktivasyon işlemi öncesi karbonca zengin ürün elde edilmiştir.

### 2.3. Karbon Küreciklerin Aktivasyonu

Karbon küreciklerin kimyasal aktivasyonu için NaOH kullanılmıştır. 1 g karbon kürecik ve 1 g NaOH (1:1, w:w) karıştırılıp paslanmaz çelik reaktörlü yatay fırında (Protherm, PZF 12/50/500) azot gazı ortamında (180 mL/dakika) 800 °C 1 saat

bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Elde edilen aktif karbon pH 7-7,5 aralığına ulaşana kadar saf su ile yıkanmış ve 100 °C'de kurutulmuştur. Piroliz işlemi esnasında orta çıkan atık gaz, gaz yıkama şişesinden geçirildikten sonra filtre sistemi bulunan çeker ocak ile ortamdaki uzaklaştırılmıştır.

#### 2.4. Karakterizasyon Çalışmaları

Karbon küreciklerin termal davranışı termogravimetrik analiz cihazı (Setaram, Setsys Evolution) ile 25 mL/dakika akış hızındaki azot gazı altında, 10 °C/dakika sıcaklık artışı ile 50-900 °C aralığında incelenmiştir. Ürünlerin (karbon kürecik ve aktif karbon) FT-IR spektrumları 750-4000 cm<sup>-1</sup> dalga boyu aralığında FT-IR spektrofotometresi ile (Perkin Elmer 1600) elde edilmiştir. Ürünlerin yüzey görüntüleri SEM (JEOL 5600-LU, UK) kullanılarak elde edilmiştir. BET yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımı, BET analizörü (Quantachrome Quadrasorb evo) kullanılarak 77 K'de N<sub>2</sub> adsorpsiyon izotermine göre belirlenmiştir. Toplam gözenek hacmi (V<sub>toplam</sub>), NLDFT (Non Local Density Functional Theory) metoduna göre P/P<sub>0</sub>=0,95'de adsorbe edilen N<sub>2</sub> miktarından elde edilmiştir. Adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan son ürünün zeta potansiyeli ise Zetasizer cihazı (Malvern) kullanılarak belirlenmiştir.

#### 2.5. Adsorpsiyon Çalışmaları

Adsorpsiyon çalışmalarında, aktif karbon'un adsorpsiyon giderim veriminin belirlenmesi için model boyar kirletici olarak kongo kırmızısı seçilmiştir. Adsorpsiyon denemeleri için 0,01 g aktif karbon alınarak, farklı konsantrasyonlarda (10-300 mg/L) 0,01 M iyonik şiddetteki kongo kırmızısı içeren 20 mL çözelti içinde dağıtılmıştır ve sıcaklık kontrollü yatay çalkalayıcıda 25 °C'de 220 rpm'de çalkalanmıştır. Belirlenen konsantrasyondaki kongo kırmızı çözeltisi 1000 mg/L stok çözeltiden elde edilmiştir. Çözeltinin pH ayarlaması 0,1 M HCl ve/veya 0,1 M NaOH çözeltileri ile gerçekleştirilmiştir. Çözeltilerin iyonik şiddeti 0,01 M NaCl ile ayarlanmıştır. Kongo kırmızısı başlangıç anındaki ve adsorpsiyondan sonra çözeltilerde kalan konsantrasyonu UV-vis spektrofotometre (Hach

Lange, DR 5000) ile 498 nm dalga boyunda tayin edilmiştir.

Kongo kırmızısının adsorbent tarafından tutulan miktarı (q, mg/g), başlangıç konsantrasyonu (C<sub>0</sub>, mg/L) ve adsorpsiyondan sonra çözeltide kalan kirletici konsantrasyonundan (C<sub>e</sub>, mg/L) hareket ile çözelti hacmi (V, L) ve kullanılan adsorbent miktarı (m, g) dikkate alınarak Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

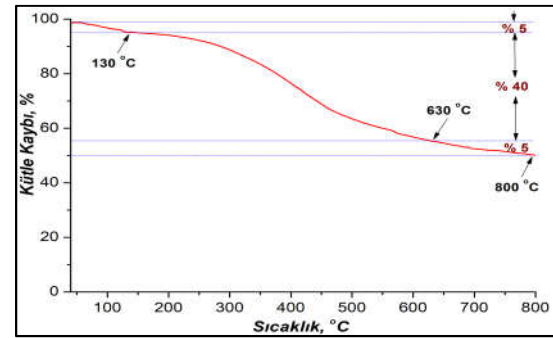
$$q = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times V \quad (1)$$

Kongo kırmızısı adsorpsiyonu üzerine, çözelti pH'sının (pH=3-11), temas süresinin (5-120 dakika), başlangıç kongo kırmızısı konsantrasyonunun (10-300 mg/L) etkisi ve adsorbentin rejenerasyonu ile yeniden kullanılabilirliği incelenmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Aktivasyon Sıcaklığının Belirlenmesi

İlk olarak karbon küreciğin azot atmosferi altındaki termal davranışı incelenmiştir. TGA sonucu elde edilen termogram Şekil 1'de gösterilmiştir.



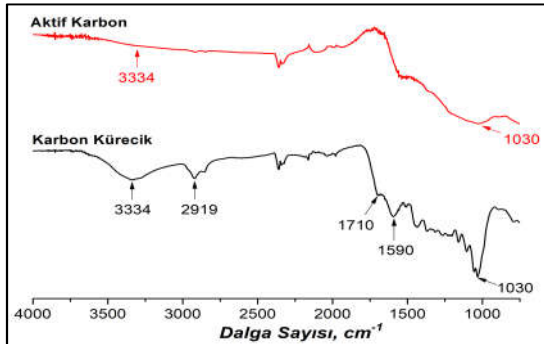
Şekil 1. Karbon kürecik termal davranışı

Şekil 1'e göre, 130 °C'ye kadar ulaşan sıcaklık artışı ile %5'lik kütle kaybı gerçekleşmiştir. Bu kütle kaybı karbon kürecik de bulunan H<sub>2</sub>O'nun uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır [12]. 130-630 °C arasında gerçekleşen kütle kaybı (%40) ise karbon kürecik bünyesindeki karbonların CO

ve CO<sub>2</sub> olarak yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır [13]. 630 °C'den sonraki sıcaklıklarda kütle kaybı (%5) yapısındaki karbon bileşiklerin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır [14]. Şekil 1'deki TGA sonucuna göre 630 °C'den sonraki sıcaklıklarda kütle kaybının oldukça az ve karbon küreciğın kararlı bir yapıya ulaştığı ifade edilebilir. Bu sonuca göre karbon küreciğın NaOH ile aktive edilme sıcaklığı 800 °C olarak belirlenmiştir.

### 3.2. Karakterizasyon Çalışmaları

Karbon küreciklerin ve NaOH ile kimyasal olarak aktive edilmesi sonucu elde edilen aktif karbonun karakterizasyonları FT-IR, BET yüzey alanı, gözenek hacimleri, gözenek boyut dağılımı ve SEM ile incelenmiştir. Elde edilen ürünlere (karbon kürecik ve aktif karbon) ait FT-IR spektrumları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Karbon kürecik ve Aktif karbon ürünlerine ait FT-IR spektrumları

Karbon küreciğeye ait FT-IR spektrumunda, 3334 cm<sup>-1</sup>'deki band-OH grubundan kaynaklanmaktadır [15]. 2919 cm<sup>-1</sup>'de görülen band alifatik C-H gerilme titreşiminden ileri gelmektedir. 1710 cm<sup>-1</sup>'de, 1590 cm<sup>-1</sup>'de ve 1030 cm<sup>-1</sup>'de görülen bandlar sırasıyla C=O, C=C ve C-O titreşimlerinden kaynaklandığı görülmektedir [16]. Şekil 1 incelendiğinde, aktif karbona ait FT-IR spektrumundaki bandların şiddetinde bir azalma olduğu görülmektedir. Bu durum aktivasyon sıcaklığında fonksiyonel grupların yapıdan uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır.

Karbon kürecik ve aktif karbonun BET yüzey alanları, toplam, mikro ve mezo gözenek hacimleri incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

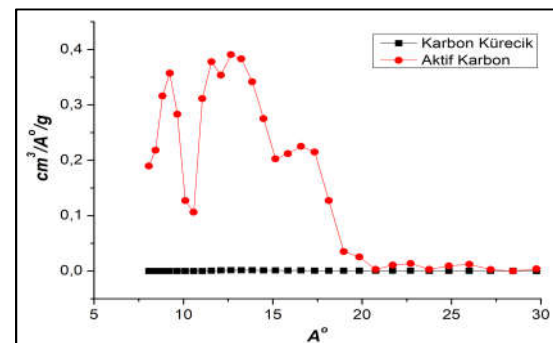
Çizelge 1. Karbon kürecik ve aktif karbon ürünlerine ait yüzey alanları ve gözenek hacimleri

Ürün	Yüzey alanı, m <sup>2</sup> /g	V <sub>toplam</sub> , cm <sup>3</sup> /g	V <sub>mikro</sub> , cm <sup>3</sup> /g	V <sub>mezo</sub> , cm <sup>3</sup> /g
Karbon Kürecik	4	0,001	-	-
Aktif Karbon	968	0,684	0,592	0,092*

$$*V_{mezo} = V_{toplam} - V_{mikro}$$

HTC sonucu elde edilen karbon küreciğın yüzey alanının (4 m<sup>2</sup>/g) oldukça küçük olduğu tespit edilmiştir. Karbon küreciğın NaOH ile aktivasyonu sonucu ise, büyük miktarda gözenekli yapının oluştuğu ve bunun sonucunda yüksek yüzey alanına sahip aktif karbon elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuca göre, oldukça sınırlı bir yüzey alanına sahip karbon küreciğın NaOH ile aktivasyonu sonucu gözenek hacminin, özellikle mikro gözenek hacmini (V<sub>mikro</sub>=0,592 cm<sup>3</sup>/g) ve yüzey alanını (968 m<sup>2</sup>/g) önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir.

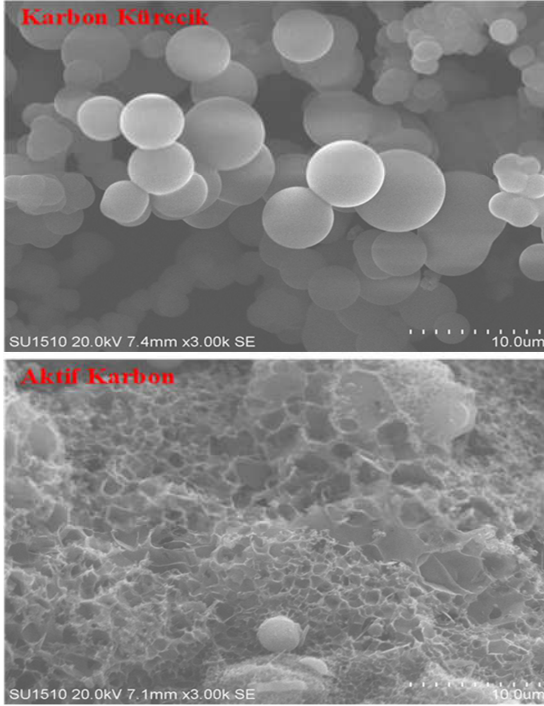
Ürünlere ait gözenek boyut dağılımları Şekil 3'de gösterilmiştir. Genel olarak aktif karbon ürünün mikro gözenek (<20 Å) dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ürünlere ait mikro ve mezo gözenek hacimleri ile de uyumludur.



Şekil 3. Karbon kürecik ve aktif karbon ürünlerine ait gözenek boyut dağılımı

Karbon kürecik ve aktif karbon ürünlerine ait yüzey morfolojilerinin gösterildiği SEM

görüntüleri Şekil 4’de verilmiştir. HTC yöntemi ile nişastanın karbon esaslı küreciklere dönüştürülebildiği görülmektedir. Yüzeyi oldukça düz bir yapıya sahip karbon kürecikler NaOH ile aktivasyon işlemi sonucunda yüzeyde çok fazla gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir.



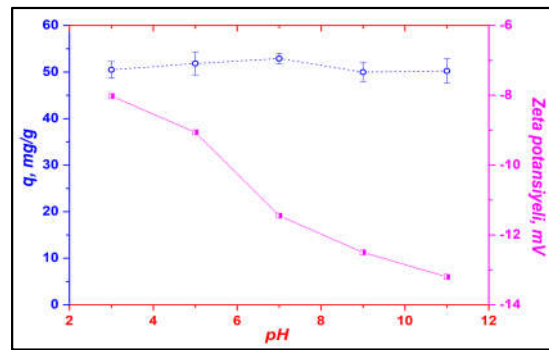
Şekil 4. Karbon kürecik ve aktif karbon ürünlerine ait yüzey görüntüleri

### 3.3. Adsorpsiyon Çalışmaları

#### 3.3.1. Çözelti pH’sının Etkisi

Kirleticilerin çözelti ortamından giderimine etki edebilen önemli parametre çözeltinin pH değeridir. Bu sebepten dolayı, 50 mg/L’lik kongo kırmızısı çözeltisinin pH değeri 3-11 arasında değiştirilip elde edilen aktif karbon ürünün adsorpsiyon verimi incelenmiştir. Şekil 5’de verilen sonuçlar incelendiğinde, adsorbentın giderim veriminin pH’dan bağımsız olduğunu, pH’ın kongo kırmızısı giderimi üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi aktif karbon ürünün pH 3-11 aralığındaki zeta potansiyel değerleri (-8,03 ile -13,2) arasında

değişmektedir. Çözeltinin pH değeri arttıkça adsorbentın negatif yükünü artırmıştır. Çözelti pH’ının yükselmesi sonucu adsorbentın negatif yüzey yükündeki artış sebebi ile elektrostatik bir itme kuvvetinin oluşması ile anyonik formdaki kongo kırmızısı giderim veriminin azalması beklenmektedir. Li ve arkadaşlarının ipek böceği koza atığından elde etmiş olduğu aktif karbon ile kongo kırmızısı gideriminin de pH 2’de maksimum giderim verimi bulmuşlardır. Bu durumu, pH 2’de pozitif yüklü adsorbent ile negatif yüklü kongo kırmızısı arasındaki elektrostatik etkileşimle açıklamışlardır [17]. Daha önce ifade edildiği gibi kongo kırmızısı giderim verimine pH’ın önemli bir etkisi olmadığı belirlenmiştir. Adsorbentın kongo kırmızısı gideriminin de zeta potansiyelinin etkisinden ziyade, adsorbentın yüzey alanının oldukça büyük olması ve gözenek boyut dağılımının rol aldığı ifade edilebilir. Elde edilen bu sonuç, literatürdeki çalışmalar ile de uyumludur. Örneğin, Dong ve arkadaşlarının silkattan elde etmiş olduğu adsorbent ile kongo kırmızısı giderimi için yapmış oldukları çalışmada, pH etkisinin kongo kırmızısı giderim kapasitesinde önemli değişimin olmadığını belirlemişlerdir [18]. Diğer bir örnekte ise, Cheng ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada rodamin B’nin sulu çözeltiden giderimi için arıtma çamurundan hazırlanmış olduğu aktif karbon kullanmışlardır. pH değişiminin rodamin B giderim verimine önemli bir etkisi olmadığı tespit etmişlerdir [19].

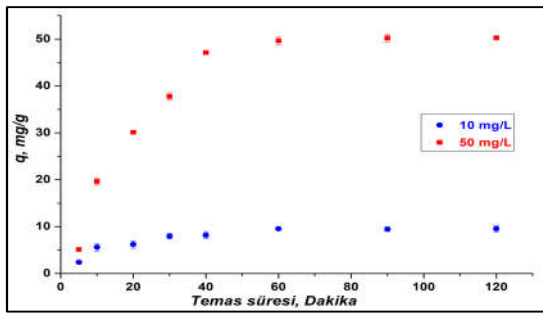


Şekil 5. Aktif karbon ile kongo kırmızısı giderimi üzerine çözelti pH’ının etkisi (C<sub>0</sub>: 50 mg/L, temas süresi: 2 saat, adsorbent miktarı: 0,5 g/L, iyonik şiddet: 0,01 M, sıcaklık: 25 °C, karıştırma hızı: 220 rpm)

Aktif karbonun pH ayarlaması yapılmadan kullanılması çevresel ve pratik uygulamalar için önemli bir avantajdır. Bu sebeple kongo kırmızısı adsorpsiyon çalışmasının diğer aşamalarında çözelti pH'larında bir ayarlama yapılmamıştır.

### 3.3.2. Temas Süresinin Etkisi

Aktif karbon ürünü ile sudaki kongo kırmızısı giderimine temas süresinin etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Aktif karbon ile kongo kırmızısı giderimi üzerine temas süresinin etkisi ( $C_0$ : 10, 50 mg/L, pH: 7,05-7,20, adsorbent miktarı: 0,5 g/L, iyonik şiddet: 0,01 M, sıcaklık: 25 °C, karıştırma hızı: 220 rpm)

İki farklı konsantrasyon (10 ve 50 mg/L) için adsorbent'in ilk 10 dakikada kongo kırmızısının büyük bir kısmını adsorbe etmiştir. Bu kısa sürede yüksek miktarda kongo kırmızısı giderimi adsorbent'in yüzeye alanın (968 m<sup>2</sup>/g) büyük olmasına atfedilebilir. Kongo kırmızısı giderimi için gerekli temas süresi 60 dakikadır (Şekil 6). 10 mg/L konsantrasyonundaki kongo kırmızısı çözeltisinin 60. dakika'ya kadar renginin tamamına yakınının giderildiği Şekil 7'de de gösterilmiştir.



Şekil 7. Aktif karbon ile kongo kırmızısı gideriminin de çözelti renginde zamanla meydana gelen azalma ( $C_0$ : 10 mg/L, pH: 7,05-7,20, adsorbent miktarı: 0,5 g/L, iyonik şiddet: 0,01 M, sıcaklık: 25 °C, karıştırma hızı: 220 rpm)

### 3.3.3. Adsorpsiyon İzoterm Analizi

Adsorpsiyon izotermi, sabit sıcaklıkta, denge çözeltisinde kalan madde konsantrasyonuna karşı adsorbent'in birim kütlesinin tutmuş olduğu madde miktarı grafiğe aktarıldığında, adsorpsiyon izotermi elde edilir [20]. Bu çalışmada adsorpsiyon verilerinin izoterm analizleri için en yaygın olarak kullanılan Langmuir, Freundlich ve Dubinin-Radushkevich (D-R) izoterm modelleri uygulanmıştır.

Langmuir izoterm modeli, adsorbent yüzeyinde bulunan belli sayıdaki bölgelerin adsorpsiyon sonucunda tek tabaka halinde kaplandığını ve belirli bir madde konsantrasyonunda yüzeyin doygunluğa eriştiğini kabul etmektedir. Langmuir izoterm modeline ait eşitliğin lineer hali Eşitlik 2'de verilmiştir [21].

$$\frac{C_e}{Q_e} = \frac{1}{Q_0 \cdot b} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (2)$$

Bu denklemde:

$C_e$ : Denge anında çözeltide kalan madde konsantrasyonu (mg/L),

$q_e$ : Denge anında adsorbent'in birim kütlesi başına adsorplanan madde miktarı (mg/g),

$Q_0$ : Langmuir adsorpsiyon kapasitesi (mg/g),

$b$ : Langmuir adsorpsiyon sabiti (L/mg)'dir.

$C_e$ 'ye karşı  $C_e/q_e$ 'nin grafiğe aktarılması sonucunda elde edilen doğrunun y eksenini kestiği nokta  $1/(Q_0 \cdot b)$ 'yi, doğrunun eğimi ise  $1/Q_0$ 'yi verir.

Adsorbent yüzeyinin homojen olmaması durumunda ve adsorplanan maddenin tanecikleri arasında etkileşim olması halinde, adsorpsiyon sistemi Langmuir izoterm modelinden sapmalar göstermektedir. Böyle durumlarda, bazı ampirik izoterm modelleri kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanı ise Freundlich izoterm modelidir. Bu modele ait eşitliğin lineer hali Eşitlik 3'de verilmiştir [22].

$$\log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$



Bu denklemde:

$C_e$ : Denge anında adsorplanmadan çözültide kalan madde konsantrasyonu (mg/L),

$q_e$ : Denge anında birim adsorbent kütlesi başına adsorplanan madde miktarı (mg/g),

k: Freundlich adsorpsiyon kapasitesi [(mg/g).(mg/L)<sup>-1/n</sup>],

n: Freundlich adsorpsiyon sabiti (L/mg)'dir.

Freundlich izoterm modeline ait k ve n değerleri, log  $C_e$ 'ye karşı log  $q_e$ 'nin grafiğe aktarılması sonucu elde edilen doğrunun sırasıyla y eksenini kestiği noktadan ve eğiminden hesaplanmaktadır.

Dubinin-Radushkevich (D-R) izotermi, Polanyi adsorpsiyon potansiyeline dayanan bir modeldir. Eşitlik 4'te gösterilen bu izoterm adsorpsiyon prosesinin fiziksel veya kimyasal olup olmadığı hakkında bilgi vermektedir [23].

$$\ln q_e = \ln X'_m - K' \varepsilon^2 \quad (4)$$

Bu denklemde:

$\varepsilon$  : Polanyi potansiyelini [RT ln (1+1/ $C_e$ )],

$X'_m$ : Adsorpsiyon kapasitesini (mg/g),

$K'$  : Adsorpsiyon enerjisi ile ilgili sabiti (mol<sup>2</sup>/J<sup>2</sup>),

R : İdeal gaz sabitini [8.314 J/(mol.K)],

T : Sıcaklığı (K)'dir.

Adsorpsiyonun ortalama enerji değeri (E), Eşitlik 4'en elde edilen  $K'$  değeri kullanılarak [ $E=(-2 K')^{-0.5}$ ] eşitliğine göre hesaplanmaktadır. Hesaplanan E değerine göre adsorpsiyonun türü hakkında bilgi edinilebilmektedir. E değeri 8-16 kJ/mol değerleri arasında yer alırsa adsorpsiyonun iyon değişimine dayandığı ifade edilmektedir. E değerinin <8 kJ/mol olması durumunda ise van der Waals kuvvetleri ile gerçekleşen fiziksel adsorpsiyondan bahsedilebilir. 16 kJ/mol değerinden büyük E değeri için ise kimyasal adsorpsiyondan söz etmek mümkündür [24].

Aktif karbon ile kongo kırmızısı adsorpsiyonu için Langmuir adsorpsiyon kapasitesi ( $Q_0$ ) 117,658 mg/g ve (b) adsorpsiyon sabiti 0,026 L/mg'dir. Freundlich izoterm modeli için

ürünün adsorpsiyon kapasitesi (k) 6,729 (mg/g).(mg/L)<sup>-1/n</sup>, (n) adsorpsiyon sabiti 1,208 olarak hesaplanmıştır. D-R izoterm modelinden hesaplanan adsorpsiyon enerjisi (E) 5,735 kJ/mol'dür. Adsorpsiyon prosesinde, E değerinin 8 kJ/mol değerinden daha küçük olduğu için fiziksel adsorpsiyonun etkin olduğunu ifade etmek mümkündür.

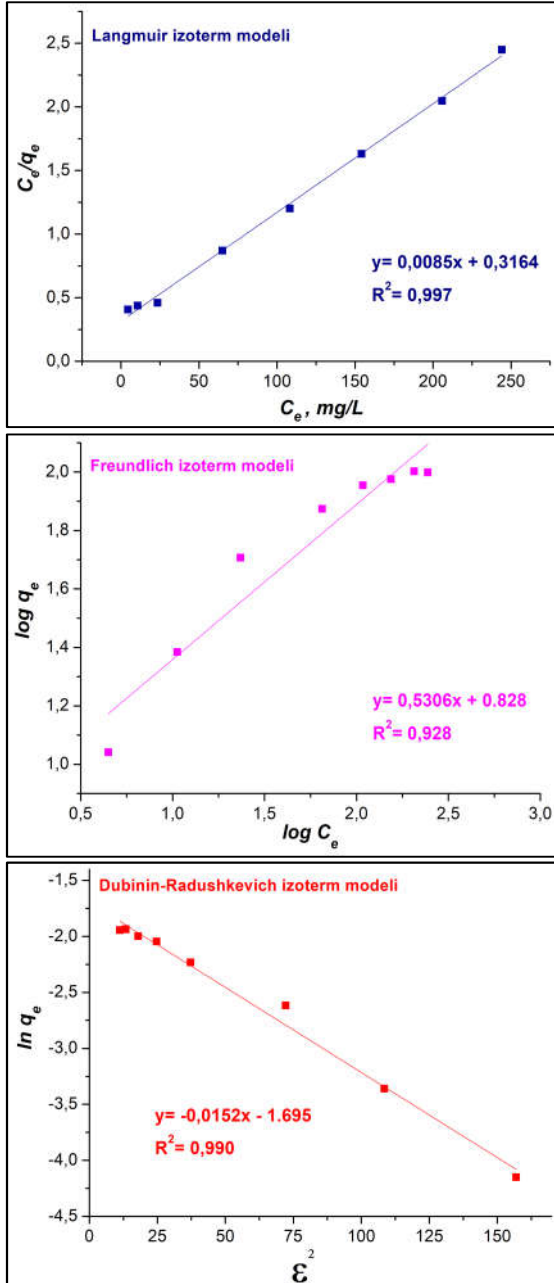
Çizelge 2 incelendiğinde ilgili izoterm modellerine ait  $R^2$  değerleri, adsorpsiyon verilerinin Langmuir izoterm modeline daha çok uyduğunu göstermektedir. Bu sonuca göre, elde edilen adsorbentin yüzeyinin homojen özellikle olduğunu ve kongo kırmızısı moleküllerinin adsorbentin yüzeyinde tek tabaka halinde adsorplandığı görülmektedir.

**Çizelge 2.** Aktif karbon ile kongo kırmızısı adsorpsiyonu için langmuir, freundlich, D-R izoterm modellerine ait sabitler

Langmuir izoterm modeli			
$Q_0$ , (mg/g)	b, (L/mg)	$R^2$	
117,658	0,026	0,997	
Freundlich izoterm modeli			
k, (mg/g).(mg/L) <sup>-1/n</sup>	n	$R^2$	
6,729	1,208	0,928	
D-R izoterm modeli			
$X'_m$ , mol/g	$K'$	E, kJ/mol	$R^2$
5,446	0,0152	5,735	0,990

**Çizelge 3.** Literatürde farklı başlangıç maddelerinden elde edilen aktif karbonların yüzey alanları ve kongo kırmızı için langmuir adsorpsiyon kapasiteleri

Adsorbent	$Q_0$ , (mg/g)	Kaynak
Eupatorium adenophorum (Kimyasal metot, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	351	[25]
Domates bitkisi sapı (Kimyasal metot, FeCl <sub>2</sub> )	158,73	[26]
<b>Aktif karbon</b>	<b>117,65</b>	<b>Bu çalışma</b>
Hünnap kabuğu	80,49	[27]
Neem yaprağı tozu	72,4	[28]
Buğday sapı	73,4	[29]
Kayısı Çekirdeği Kabuğu (Kimyasal metot, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	32,85	[30]



Şekil 8. Aktif karbon ile kongo kırmızısı adsorpsiyonu için Langmuir, Freundlich, D-R izoterm modelleri ( $C_0$ : 10-300 mg/L, pH: 7,02-7,10, temas süresi: 60 dakika, adsorbent miktarı: 0,5 g/L, sıcaklık: 25 °C, iyonik şiddet: 0,01 M, karıştırma hızı: 220 rpm)

Kongo kırmızısı için aktif karbon ürününün Langmuir adsorpsiyon kapasitesi (117,658 mg/g) ile literatürdeki aktif karbonların kapasiteleri Çizelge 3’de karşılaştırılmıştır. Elde edilen aktif karbonun pek çok adsorbentten daha yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir.

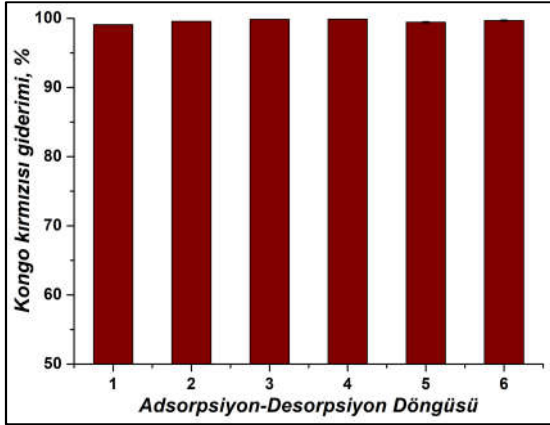
### 3.3.4. Yeniden Kullanılabilirlik

Aktif karbonun yeniden kullanılabilme özelliği belirlenebilmesi için desorpsiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon işlemi, uygun çözücülerin kullanımı ile katı-sıvı ekstraksiyon yöntemleri ve pH değişimi ile yapılmaktadır [31].

Başlık 3.3.1’de adsorbentin kongo kırmızısı gideriminde çözeltinin pH değerinden etkilenmediği belirtilmiştir. Bu sebepten, desorpsiyon işleminde katı-sıvı ekstraksiyon yöntemi tercih edilmiştir. Katı-sıvı ekstraksiyon yönteminde desorpsiyon işlemi için çözücü olarak etanolün kullanılabileceği (Chern ve Wu, 2001) ve (Alatalo ve ark., 2016) tarafından gösterilmiştir [31,32]. Etanolün kullanım avantajı, oda sıcaklığında buharlaştırılması ve desorbe edilen boyar maddelerin yeniden kullanılabilmesidir.

Bu bilgilere göre, 25 mg/L kongo kırmızısı adsorpsiyonun da kullanılan 0,5 g/L miktarındaki Aktif karbonun desorpsiyonu 15 dakika süresince 10 mL etanol ile yıkanarak gerçekleştirilmiştir. Desorpsiyon çözeltisinden uzaklaştırılan ve oda sıcaklığında kurutulan Aktif karbon adsorpsiyon-desorpsiyon döngülerinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 9’da gösterilmiştir.

Aktif karbonun giderim veriminde bir değişim olmadan en az 6 kez adsorpsiyon-desorpsiyon döngüsünde kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu sonuca göre, desorbe edilen adsorbentin kongo kırmızısı giderimin de yeniden kullanılabilir olduğu ifade edilebilir.



**Şekil 9.** Aktif karbon'un kongo kırmızısı gideriminde yeniden kullanılabilme potansiyeli (Desorpsiyonda kullanılan çözücü: etanol, adsorpsiyon prosesi için  $C_0$ : 25 mg/L, temas süresi: 1 saat, pH: 7,00-7,10, adsorbent miktarı: 0,5 g/L, iyonik şiddet: 0,01 M, sıcaklık: 25 °C, karıştırma hızı: 220 rpm)

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada doğal bir madde olan nişasta hidrotermal karbonizasyon (HTC) tekniği ile karbonca zengin bir ürüne dönüştürülmüştür. Ardından NaOH ile kimyasal aktivasyon işlemi ile yüksek yüzey alanına sahip aktif karbon elde edilmiştir. Nişastanın hidrotermal karbonizasyonu sonucu elde edilen karbon küreciğın yüzey alanı ( $4 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ve toplam gözenek hacmine ( $0,001 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) sahiptir. NaOH ile kimyasal aktivasyonu sonucu elde edilen aktif karbonun ise oldukça yüksek yüzey alanına ( $968 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ve toplam gözenek hacmine ( $0,684 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) sahip adsorbent elde edilmiştir. Ürünlerin yapısal ve morfolojik değişimleri FT-IR, SEM ve BET yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımı teknikleri ile incelenmiştir. Kongo kırmızısı ile gerçekleştirilen denemeler sonucunda, adsorbent olarak etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Adsorbentin kongo kırmızısı için Langmuir adsorpsiyon kapasitesinin ( $117,65 \text{ mg/g}$ ) literatürdeki birçok karbon esaslı adsorbentten daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Adsorbentin çözelti pH'ından bağımsız bir şekilde kongo

kırmızısı adsorpsiyonunda kullanılabilmesi, pratik uygulamalar için önemli bir avantaj olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca adsorbentin giderim kapasitesinde bir azalma olmadan en az 6 kez adsorpsiyon desorpsiyon döngüsünde kullanılabilir özellikte olduğu görülmüştür.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Abbasa, M., Trari, M., 2015. Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic Study on the Removal of Congo Red from Aqueous Solutions By Adsorption onto Apricot Stone, *Process Saf. Environ. Prot.*, 98, 424-436.
2. Duman, O., Tunç, S., Polat, T.G., Bozoglan, B.K., 2016. Synthesis of Magnetic Oxidized Multiwalled Carbon Nanotube-K-carrageenan- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nanocomposite Adsorbent and its Application in Cationic Methylene Blue Dye Adsorption, *Carbohydr. Polym.*, 147, 79-88.
3. Kobya, M., Bayamoglu, M., Eyvaz, M., 2007. Techno-economical Evaluation of Electrocoagulation for the Textile Wastewater Using Different Electrode Connections, *J. Hazard. Mater.*, 148, 311-318.
4. Liu, M., Chen, Q., Lu, K., Huang, W., Lü, Z., Zhou, C., Yu, S., Gao C., 2017. High Efficient Removal of Dyes from Aqueous Solution Through Nanofiltration Using Diethanolamine-Modified Polyamide Thin-film Composite Membrane, *Sep. Purif. Technol.*, 173, 135-143.
5. Bedin, K.C., Martins, A.C., Cazetta, A.L., Pezoti, O., Almeida V.C., 2016. KOH-activated Carbon Prepared from Sucrose Spherical Carbon: Adsorption Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies for Methylene Blue Removal, *Chem. Eng. J.*, 286, 476-484.
6. Yin, J., Pei, M., He, Y., Du, Y., Guo, W., Wang, L., 2015. Hydrothermal and Activated Synthesis of Adsorbent Montmorillonite Supported Porous Carbon Nanospheres for Removal of Methylene Blue from Waste Water, *RSC Adv.*, 5, 89839-89847.
7. Tongur, S., Aydın M.E., 2013. Adsorption Kinetics of Chloroform Aqueous Solutions onto Activated Lignite. *Clean-Soil, Air, Water*, 41,1-5.

8. Li, M., Wang, S., Luo, W., Xia, H., Gao, Q., Zhou, C., 2015. Facile Synthesis and in Situ Magnetization of Carbon-decorated Lignocellulose Fiber for Highly Efficient Removal of Methylene Blue, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 90,1124-1134.
9. Xiao, H., Guo, Y., Liang, X., Qi, C., 2010. One-step Synthesis of Novel Biacidic Carbon Via Hydrothermal Carbonization, *J. Solid State Chem.*, 183, 1721-1725.
10. Kazak, O., Eker, Y.R., Bingol, H., Tor, A., 2018. Preparation of Chemically-activated High Surface area Carbon from Waste Vinsasse and its Efficiency as Adsorbent Material, *J. Mol. Liq.*, 272, 189-197.
11. Kazak, O., Eker, Y.R., Akın, I., Bingol, H., Tor, A., 2017. Green Preparation of a Novel Red Mud@carbon Composite and its Application for Adsorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid from Aqueous Solution, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 24, 23057-23068.
12. Szymański, S., Karpinski, Z., Biniak, S., Swiatkowski, A., 2002. The Effect of the Gradual Thermal Decomposition of Surface Oxygen Species on the Chemical and Catalytic Properties of Oxidized Activated Carbon, *Carbon*, 40, 2627-2639.
13. Cheng, F., Luo, H., Hu, L., Yu, B., Luo, Z., Fidalgo de Cortalezzi, M., 2016. Sludge Carbonization and Activation: From Hazardous Waste to Functional Materials Forwater Treatment, *J. Environ. Chem. Eng.*, 4, 4574-4586.
14. Lin, Y., Liao, Y., Yu, Z., Fang, S., Lin, Y., Fan, Y., Peng, X., Ma, X., 2016. Co-pyrolysis Kinetics of Sewage Sludge and Oil Shale Thermal Decomposition Using TGA-FTIR analysis, *Energy. Conversion. Manage.* 118, 345-352.
15. Unur, E., 2013. Functional Nanoporous Carbons from Hydrothermally Treated Biomass for Environmental Purification, *Microporous Mesoporous Mater.*, 168, 92-101.
16. Yan, Q., Street, J., Yu, F. 2015. Synthesis of Carbon-encapsulated Iron Nanoparticles from Wood Derived Sugars by Hydrothermal Carbonization (HTC) and Their Application to Convert Bio-syngas into Liquid Hydrocarbons, *Biomass and Bioenergy* 83, 85-95.
17. Li, J., Dickon, H.L. Ng, D.H.L, Song, P., Kong, C., Song, Y., Yang, P., 2015. Preparation and Characterization of High-surface-area Activated Carbon Fibers from Silkworm Cocoon Waste for Congo Red Adsorption, *Biomass and Bioenergy* 75, 189-200.
18. Dong, W., Lu, Y., Wang, W., Zong, L., Zhu, Y., Kang, Y., Wang, A., 2019. A New Route to Fabricate High-efficient Porous Silicate Adsorbents by Simultaneous Inorganic-organic Functionalization of Low-grade Palygorskite Clay for Removal of Congo Red, *Microporous Mesoporous Mater.*, 277, 267-276.
19. Cheng, F., Luo, H., Hu, L., Yu, B., Luo, Z., Fidalgo de Cortalezzi, M., 2016. Sludge Carbonization and Activation: From Hazardous Waste to Functional Materials Forwater Treatment, *J. Environ. Chem. Eng.*, 4, 4574-4586.
20. Chiou, C.T., 2002. Fundamentals of the Adsorption Theory: in *Partition and Adsorption of Organic Contaminants in Environmental Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 39-52.
21. Langmuir, I., 1916. The Constitution and Fundamental Properties of Solids Andliquids, Part I. Solids, *J. Am. Chem. Soc.*, 38, 2221-2295.
22. Freundlich, H.M.F., 1906. Über die Adsorption in Lösungen, *Z., Phys. Chem.*, 385-470.
23. Dubinin, M.M., 1966. *Chemistry and Physics of Carbon*, 2, 51, Dekker, New York.
24. Dubinin, M.M., Radushkevich, L.V., 1947. The Equation of the Characteristic Curve of Activated Charcoal. *Proceedings of the Academy of Sciences, Physical Chemistry Section*, 55, 331.
25. Li, C., Zhang, L., Xia, H., Peng, J., Zhang, S., Cheng, S., Shu J., 2016. Kinetics and Isotherms Studies for Congo Red Adsorption on Mesoporous Eupatorium Adenophorum-based Activated Carbon Via Microwave-induced H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Activation, *J. Mol. Liq.*, 224, 737-744.
26. Fu, K.F., Yue, Q.Y., Gao, B.Y., Wang, Y., Li, Q., 2017. Activated Carbon from Tomato Stem By Chemical Activation with FeCl<sub>2</sub>, *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 529, 842-849.

27. El Messaoudi, N., El Khomri, M., Dbik, A., Bentahar, S., Lacherai, A., Bakiz, B., 2016. Biosorption of Congo Red in a Fixed-bed Column from Aqueous Solution Using Jujube Shell: Experimental and Mathematical Modeling, *J. Environ. Chem. Eng.*, 4(4), 3848-3855.
28. Panda, G.C., Das, S.K., Guha, A.K., 2009. Jute Stick Powder as a Potential Biomass for the Removal of Congo Red and Rhodamine B from their Aqueous Solution, *J. Hazard. Mater.*, 164, 374-379.
29. Wang, Z.W., Han, P., Jiao, Y.B., He, X.T., Dou, C.C., Han, R.P., 2011. Adsorption of Congo Red Using Ethylenediamine Modified Wheat Straw, *Desalination Water Treatment*, 30, 195-206.
30. Abbas, M., Trari, M., 2015. Kinetic, Equilibrium and Thermodynamic Study on the Removal of Congo Red from Aqueous Solutions By Adsorption onto Apricot Stone, *Process Saf. Environ. Prot.*, 98, 424-436.
31. Alatalo, S.M., Mäkilä, E., Repo, E., Heinonen, M., Salonen, J., Kukk E., 2016. Mesoand Microporous Soft Templated Hydrothermal Carbons for Dye Removal from Water, *Green Chem.*, 18, 1137-1146.
32. Chern, J.M., Wu, C.Y., 2001. Desorption of Dye from Activated Carbon Beds: Effects of Temperature, pH and Alcohol, *Water Res.*, 35, 4159-4165.



## Fabrication and Characterization of CuO Nanostructures: Applications in Electrocatalytic Hydrogen Production

Evrım BARAN AYDIN\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, University of Kilis 7  
Aralık, Kilis

Geliş tarihi: 14.11.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Abstract

Hydrogen which is a renewable and sustainable form of energy to replace fossil fuels has been attracted great interest because of clean emission and high conversion efficiencies. To make water electrolyzer more profitable and economical, the selection of electrodes having low overpotentials, low-cost and stable with well electrocatalytic activity is required. In this study, CuO nanostructures were fabricated by chemical techniques. The morphologies and structures of CuO nanostructures were studied in detail by FE-SEM, BET, and XRD. Three different morphologies of CuO (Nanorod, nanoflake and nano-flower nanostructures) were synthesized. The contact angle measurements were carried out to state the surface properties of the synthesized materials. The cathodic polarization, open circuit potential-time measurements, impedance measurements and Mott-Schottky analysis were carried out in 1M KOH solution to determine the electrocatalytic performance of electrodes in hydrogen formation reaction. Besides, energy consumption efficiencies of electrodes for alkaline electrolysis were investigated.

**Keywords:** CuO, Nanostructures, Hydrogen evolution, Energy requirement

## CuO Nanoyapıların Karakterizasyonu ve Üretimi: Elektrokatalitik Hidrojen Üretimindeki Uygulamaları

### Öz

Yenilenebilir ve sürdürülebilir bir enerji şekli olarak fosil yakıtların yerini alabilecek başlıca enerji kaynaklarından biri olan hidrojen, temiz emisyon ve yüksek dönüşüm verimliliği nedeniyle artan bir ilgi görmektedir. Suyun elektrolizi ile H<sub>2</sub> üretimini daha verimli ve ekonomik hale getirmek için, elektrotların aşırı gerilimlerinin azaltılması ve aynı zamanda, iyi bir elektrokatalitik etkinliğe sahip ucuz ve kararlı elektrotların seçilmesini gerektirir. Bu çalışmada, CuO nanoyapılar, kimyasal teknikle sentezlenmiştir. CuO nanoyapıların morfolojileri ve yapıları, FE-SEM, BET ve XRD ile ayrıntılı olarak karakterize edilmiştir. Üç farklı morfolojiye sahip CuO nanoyapılar (Nanorod, nanoflake ve nano-çiçek) elde edilmiştir. Elde edilen malzeme yüzeylerinin ıslanma davranışını belirlemek için temas açısı ölçümleri kullanılmıştır. Elektrotların hidrojen oluşum reaksiyonundaki elektrokatalitik etkinliği hakkında bilgi edinmek amacıyla katodik polarizasyon, açık devre-süre ölçümleri, impedans ölçümleri ve Mott-Schottky analizi 1M KOH çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, alkalın elektroliz için elektrotların enerji tüketim verimlilikleri incelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** CuO, Nanoyapılar, Hidrojen evrimi, Enerji ihtiyacı

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): E. Baran AYDIN, [evrimbaran@kilis.edu.tr](mailto:evrimbaran@kilis.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

The energy requirement in the world is increasing rapidly. The supply of energy requirements without polluting the environment forms the basis of the study subjects. In this context, it is accepted that the most advanced technology is the hydrogen energy system. Hydrogen energy does not threaten human and environmental health. Hydrogen can be obtained from fossil fuels such as coal and natural gas, as well as from water and biomass. An ideal energy fuel should be easily and safely transported anywhere, the energy loss during transport should be little or no, it should be stored, inexhaustible, safe, very light, carbon-free and economical. In this context, hydrogen can be considered as a clean energy source that can replace fossil fuels with zero carbon emission, recyclability and high energy capacity [1,2]. Techniques such as electrolysis, photocatalysis and thermolysis are commonly used for hydrogen production. Photoelectrochemical cells are being investigated extensively not only because they enable the electrolysis of water by utilizing solar energy, but also by separating the hydrogen formation reaction (HER) and oxygen formation reaction (OER) mechanisms, thereby enabling kinetic investigations of each half cell reaction. Various semiconductors have been promising for the production of hydrogen by photoelectrochemical separation of water due to their long-term chemical stability and high electron efficiency [3-5]. Generally, n-type semiconductors such as  $\text{TiO}_2$  [5],  $\text{WO}_3$  [6],  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [7],  $\text{BiVO}_4$  [8] and  $\text{Ag}_3\text{PO}_4$  [9] are more positive than the valence band region  $\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$  redox pair. They can be used as photoanodes for the reaction. On the other hand, p-type semiconductors whose conductor band edge is more positive than  $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$  potential can be used as photocathodes for HER [10]. For example, p-GaInP<sub>2</sub> [11], p-InP [12], p-WSe [13], p-Si [14], p-CdS [15], and p-type copper oxides have been investigated as possible candidates for photocathode in water electrolysis. Among these p-type semiconductors, cupric oxides ( $\text{Cu}_2\text{O}$  and  $\text{CuO}$ ) are great interest due to its wide absorption band in the visible area, high availability in the

earth's crust, easy to prepare, low cost and low environmental toxicity. The formation of these oxides depends on the conditions under which oxidation occurs. Metallic copper,  $\text{CuO}$  and  $\text{Cu}_2\text{O}$  have different crystal structures. The easy reduction of  $\text{CuO}$  to  $\text{Cu}_2\text{O}$  and the high stability of  $\text{Cu}_2\text{O}$  are because that the oxygen bond energy of  $\text{Cu}_2\text{O}$  is much higher than that of  $\text{CuO}$ . However,  $\text{CuO}$  has higher solar absorption than  $\text{Cu}_2\text{O}$  because it has a smaller bandgap of 1.5 eV [16].

Copper is used in solar panels, magnetic storage, electronic devices, catalyst and gas sensors due to its unique thermal, magnetic, optical and catalytic properties. It is of particular importance in the electrical/electronics industry, especially because of its low cost. The interest in nano-scale structures is increasing day by day with the expansion of the usage areas. Studies show that metal nanomaterials have superior electronic, magnetic, optical, chemical and catalytic properties depending on their size, shape, surface components and atomic arrangement on the surface.  $\text{CuO}$  nanostructures such as thin-film nanoparticles, nanowires, nanorods, nanoscreens, nanomembranes and microflores can be synthesized using direct thermal oxidation of copper plates and hydrothermal methods [17]. On the other hand, a very small group succeeded in the synthesis of  $\text{CuO}$  nanotube using expensive and complex methods based on anodic aluminum oxide membrane template [18], hydrothermal treatment of  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  and direct thermal oxidation of copper.  $\text{CuO}$  nanostructures are thought to be active in photocatalytic reduction of water.

In the present study,  $\text{CuO}$  nanostructures were synthesized by the chemical technique. The morphologies and structures of  $\text{CuO}$  nanostructures were characterized in detail by FE-SEM, BET, and XRD. Cathodic polarization, impedance measurements and Mott-Schottky analysis were carried out in 1M KOH solution to attain information about the electrocatalytic activity of electrodes in hydrogen formation reaction. Also, energy consumption efficiencies of electrodes for alkaline electrolysis were investigated.



## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

Copper foils with the thickness of 0.5 mm (99.9% purity) were used at all the experiments. Ammonium persulfate ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, 98%), Sodium hydroxide (NaOH), hydrochloric acid (HCl, 37%), acetone, and ethanol were bought in Merck company. The experiments were performed at 25°C and distilled water were used in the experiments. The analytical grade chemicals without any further purification were used during all the work.

### 2.2. Synthesis of the CuO Nanostructure

Before the synthesis of CuO nanostructures, the Cu foils with the size of 1.5x1 cm were chemically polished in 3M HCl for 10 min to remove the surface impurities and following, mechanically polished were performed. Finally the foils were degreased by ultrasonic cleaning in acetone, ethanol and distilled water for 10 min, respectively. Then the oxygen stream was used to dry the foils. The pre-cleaned Cu foils were immersed in a solution containing 13 mL of 10 M NaOH, 5 mL of 1 M (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, and 48 mL of deionized water for 30, 60 to 180 min. The foils with a layer of Cu(OH)<sub>2</sub> nanostructures were then rinsed with ethanol and deionized water and dried in air. To obtain crystalline CuO nanostructures, the heat treatment was performed. The foils were exposed to 150 °C for 1 h to remove the water, and then the temperature was raised to 200 °C, and this process was applied for 2 hours to provide crystallization in air atmosphere.

### 2.3. Characterization of the CuO Nanostructures

The Zeiss/Supra 55 field emission-scanning electron microscope (FE-SEM) at high vacuum and 10.00 kV EHT was utilized to attain information about surface characterization of the CuO nanostructures. The Rigaku Smart Lab diffractometer (XRD) with Cu K $\alpha$  radiation employed at 40 kV and 30 mA between 2 $\theta$  values of 20-80° with a scan rate of 5 ° min<sup>-1</sup> was used to

determine the crystal phases of the samples. The manual optical tensiometer (KSV Attension ThetaLite TL 101) was employed to examine the water contact angle of the surface of the samples, using the sessile drop method. the Vickers hardness of electrodes were measured by Shimadzu HMV-G microhardness tester with a load of 490.3 mN and a dwell time of 7 s.

### 2.4. Electrochemical Measurements

The electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and other electrochemical measurements were benefited from the CHI 604E A.C. electrochemical analyzer. In this measurement, a platinum sheet (with 2 cm<sup>2</sup> surface area) as the counter electrode and Ag/AgCl (3 M KCl) electrode as the reference electrode were utilized.

The EIS measurements were recorded between 100 kHz and 0.01 Hz with the amplitude voltage of a 5 mV at the open circuit potential in 1 M KOH media. The fitting of the results of EIS measurements was performed using the Zview software. The charge carrier density and flat band potential of the electrodes were determined using the Mott-Schottky (MS) approach. The Mott-Schottky measurements were recorded at 10<sup>3</sup> Hz and the range of -0.2 to 0.8 V vs. Ag/AgCl (3 M KCl) in 1 M KOH electrolyte. In the MS measurements, potential step was selected as 10 mV. The current-potential curves were recorded at the potentials from the open circuit potential (OCP) down to -1.8 V. The measurements were carried out after the time necessary to reach a quasi-stationary value (1 h). In this measurement, a scan rate of 5 mV s<sup>-1</sup> was chosen.

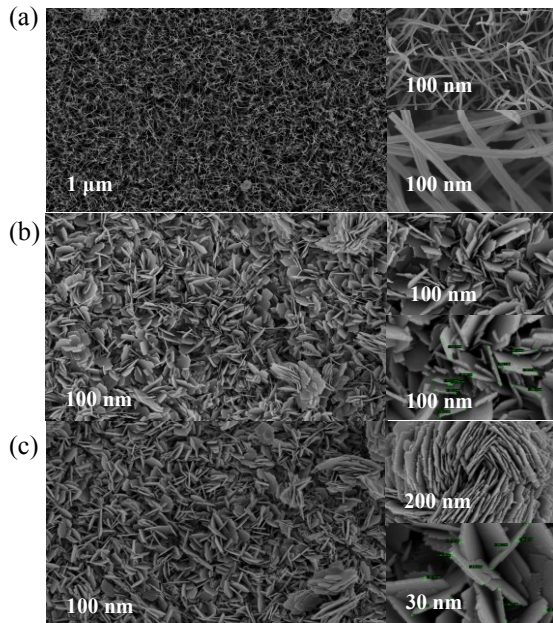
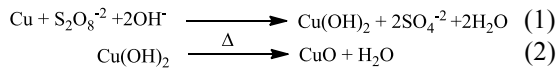
The H<sub>2</sub> evolution measurements of the electrodes were carried out under bias voltages of -1.8, 2.0 and 2.2 V for 30 min in 1M KOH solution in 3 replications. A reverted burette was utilized for the measurements of the evolution H<sub>2</sub> gas amount during the process. The energy efficiency and consumption measurements of the electrodes were carried out by CHI 660D Potentiostat/Galvanostat in 1M KOH electrolyte at 298 K. In the measurements, the current densities were selected as 25, 50 and 100 mA cm<sup>-2</sup>. The electrolysis time

of 30 min was applied for the energy efficiency and consumption measurements.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

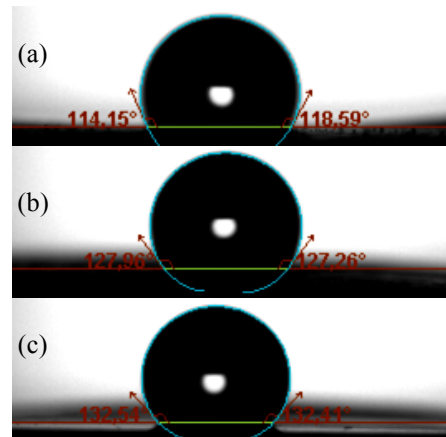
#### 3.1. Structural Properties of CuO Nanomaterials

A rapid oxidation of the copper surface by the presence of ammonium persulfate results in the formation of copper hydroxide (Cu(OH)<sub>2</sub>) on the surface. Also, Sodium hydroxide can oxidize the copper surface even though it lasts longer [19]. The released Cu<sup>2+</sup> cations subsequently react with the hydroxide anions in the solution to create Cu(OH)<sub>2</sub> on the substrate. The light blue Cu(OH)<sub>2</sub> layer appeared on the surface of Cu foil is slowly turned into the CuO by heat treatment. The overall chemical equation is summarized in Equations 1 and 2 [20,21];



**Figure 1.** FE-SEM (top and cross section views) of (a) CuO-30 min, (b) CuO-60 min, and (c) CuO-1800 min electrodes

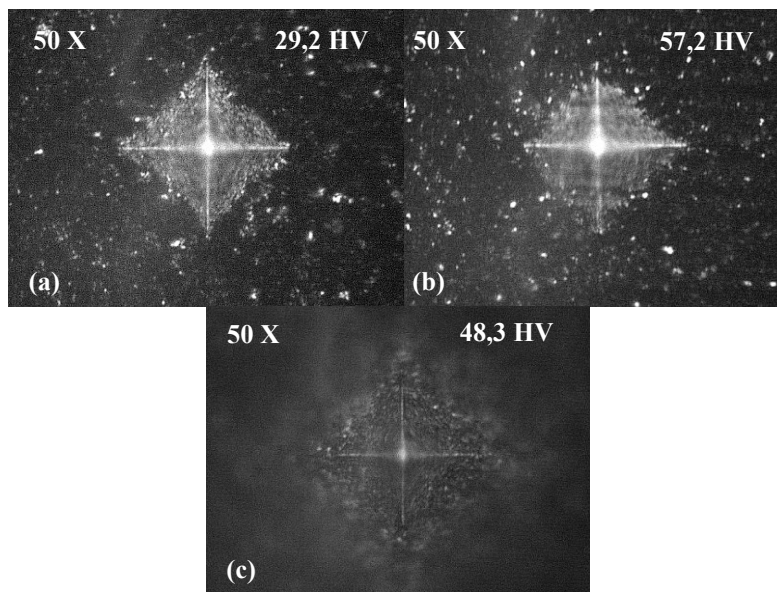
After immersed into the alkaline solution at the 30 min, CuO nanorod array structures are formed on the substrates and exhibit a well uniformity, as shown in Figure 1a. The nanorods having a diameter of about 155-237 nm developed obliquely to form grasslike clusters that overlap and interlace each other. Increasing the reaction time to 60 minutes, the rods totally disappeared and the copper layer surface is only covered by the nanostructure which are composed of interconnected thin flakes, due to a partial dissolution of the center of the rods. As can be seen from Figure 1b, the average nano-flakes corner length and the thickness of the flakes nanostructures were found to be 246.10±79.25 nm and 33.56 nm±5.16, respectively. The stacking the nanoribbons with hydrogen bonding interactions creates the nanorods. The high NaOH concentration leads to weakening of the interlayer hydrogen bond linkages at the sheet edges. this causes stresses in the layers. for this reason, the ribbons were rolled to decrease the stresses, yielding the ultimate tubular structure. When the reaction time was sustained to 1800 min, the structure of nanoflakes CuO formed on the substrate increase in the surface and flower-like morphological structures are formed in certain regions. As shown in Figure 1c, the thickness of the nano-flakes and the average nano-flakes corner length were determined to be 33.56 nm±5.16 and 418.32±79.25 nm, respectively.



**Figure 2.** Water contact angles images of (a) CuO-30 min, (b) CuO-60 min, (c) and (c) CuO-1800 min electrodes

Figure 2 shows the contact angle measurement results of CuO nanostructures. The contact angles of the nanorod, nanoplate (nanoflakes) and nano-flower-like CuO structures with water were determined as  $116.4^\circ$ ,  $127.6^\circ$  and  $132.5^\circ$ , respectively. The results show that the surface exhibits hydrophobic behavior and that the surface goes towards superhydrophobicity depending on the surface morphology. Superhydrophobic surfaces generally have contact angle values of  $150^\circ$  or

greater. Superhydrophobic surfaces exhibit properties such as low energy surface and high surface roughness. The changes such as surface chemical composition, morphology, and surface roughness formed on the surface of CuO materials can directly influence the wetting behavior. Wetting behavior of micro- and nanostructured CuO layer surfaces is closely related to morphological factors such as curtain, height and shape [22].

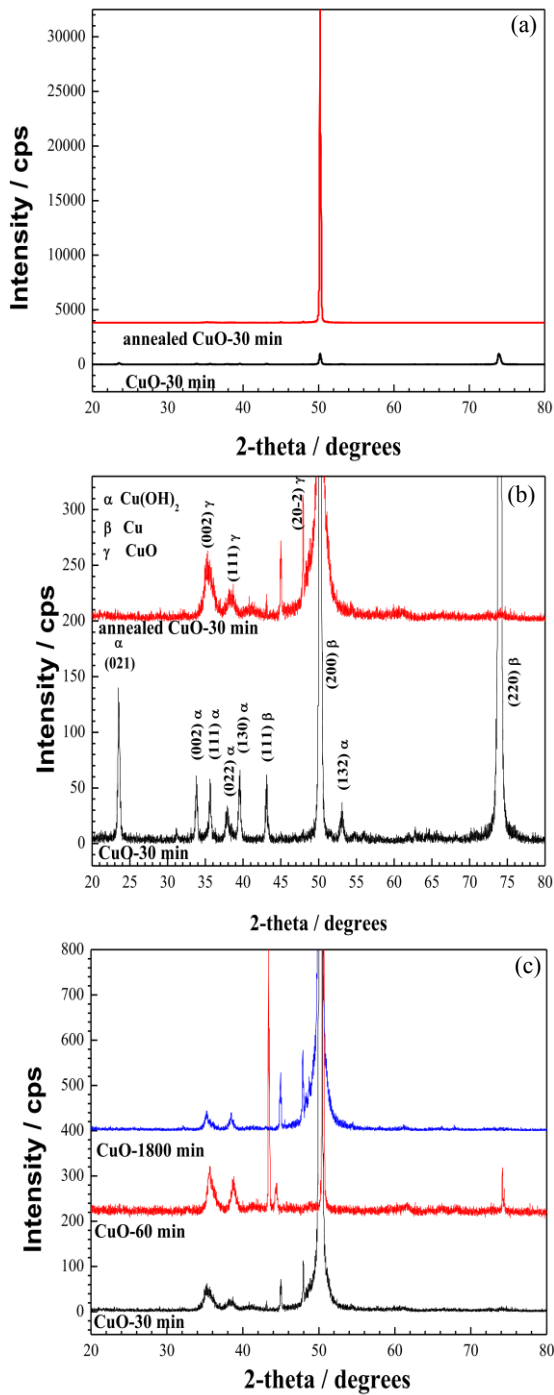


**Figure 3.** Microhardness results under indentation loads of 490.3 mN for (a) CuO-30 min, (b) CuO-60 min, (c) and (c) CuO-1800 min electrodes

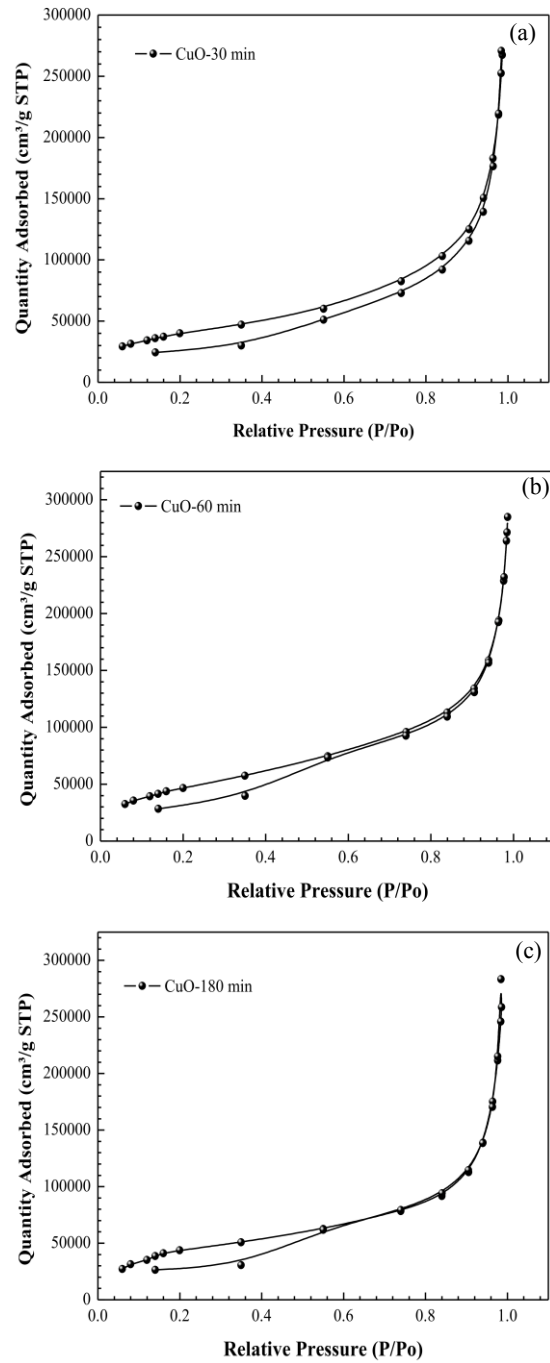
Microhardness measurement results of CuO nanostructures synthesized chemically at different times are presented in Figure 3. Microhardness results in Vickers for CuO-30 min, CuO-60 min, v CuO-1800 min electrodes were 29, 48 and 57 HV, respectively. The results showed that the surface morphology changed with increasing time caused small changes on the hardness and the increase in the hardness value partly due to the decreased surface stress of the nano-flower morphology produced at 1800 min.

Figure 4 shows the XRD results of heat-treated and without heat-treated Cu/CuO nanostructures after immersion in  $\text{NaOH}/(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  aqueous solution for 30-1800 minutes. In all XRD results,

three peaks with  $2\theta$  value of  $43^\circ$ ,  $51^\circ$  and  $75^\circ$  corresponding to the planes of Cu (111), (200) and (220) were observed (JCPDS file No. 04-0836) [23]. As seen from the XRD result of the CuO-30 min electrode without heat treatment, the diffraction peaks having values of  $2\theta$  to about  $24^\circ$ ,  $34^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $38^\circ$ ,  $40^\circ$  and  $53^\circ$  can be indexed the planes of the orthorhombic  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  planes of (002), (111), (022), (130) ve (132) (JCPDS file no. 80-0656) [24]. When XRD results of heat treated CuO-30, CuO-60 and CuO-1800 electrodes were examined, orthorhombic  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  peaks disappeared, and the CuO peaks in  $2\theta$  values at  $35.5^\circ$  ve  $38.8^\circ$  corresponding to (002) and (111) planes were formed. (JCPDS file No. 80-1916) [25].



**Figure 4.** XRD patterns of CuO-30 min without heat, annealed CuO-30 min, CuO-60 min, and CuO-1800 min electrodes



**Figure 5.** The measurement results according to Brunauer-Emmett-Teller using nitrogen gas for CuO-30 min (a), CuO-60 min (b), and CuO-1800 min (c) electrodes

As can be seen from Figure 5, the BET surface areas of CuO-30 min, CuO-60 min, and CuO-1800 min electrodes were determined as 11.6, 14.6 and 12.1 m<sup>2</sup>/g, respectively. The results indicated that the surface area did not change significantly depending on the change in the surface morphology.

### 3.2. Electrochemical Characterization of CuO Nanostructures

Open circuit potentials (OCP) as a function of time in 1 M KOH electrolyte for CuO-30 min, CuO-60 min and CuO-1800 min electrodes are given in Figure 6. Figure 6 shows that the CuO-30 min electrode has more negative open circuit potential. It indicates that CuO-30 min electrode with more negative potential is more active in hydrogen formation reaction (HER) than other electrodes.

Electrochemical impedance (EIS) results recorded in open circuit potential (OCP) in 1 M KOH electrolyte for CuO-30 min, CuO-60 min and CuO-1800 min electrodes are presented in Figure 7. The charge transfer resistances of CuO-30 min, CuO-60min and CuO-1800 min electrodes from Nyquist curves were determined as 472 Ω cm<sup>2</sup>, 639 Ω cm<sup>2</sup> and 1100 Ω cm<sup>2</sup>, respectively. When the charge transfer resistors are considered, it is seen that CuO-30 min electrode has lower resistance value. The low resistance value indicates that the nanorod structure acts as free electroactive adsorption zones by increasing the H<sup>+</sup> adsorption in the active cathodic regions of the nanorod morphology of CuO-30 min electrode. This event increases HER catalytic activity [26].

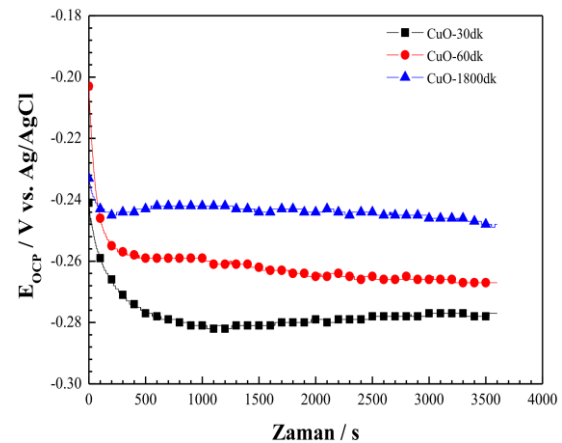
Mott-Schottky (M-S) analysis was carried out to investigate the variation in capacitances at the semiconductor-electrolyte interface with the applied voltage. M-S analysis was employed to obtain the flat band potentials ( $E_{FB}$ ) and the charge carrier densities ( $N_D$ ) of CuO electrodes.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{q\epsilon\epsilon_0 N_D} \left[ (E - E_{FB}) - \frac{k_B T}{q} \right] \quad (3)$$

Where  $C$ ,  $\epsilon$ ,  $\epsilon_0$  and  $q$  are the capacitance (F.cm<sup>-2</sup>), the relative permittivity of CuO, the vacuum permittivity (8.854.10<sup>-12</sup> F.m<sup>-1</sup>) and elementary electric charge (1.602.10<sup>-19</sup> C), respectively. Capacitance  $C$  was calculated from the following equation;

$$C = (2\pi f Z'' )^{-1} \quad (4)$$

Where  $f$  is the frequency (10<sup>3</sup> Hz) and  $Z''$  is the imaginary component of the impedance. As can be seen from Figure 8, the Mott-Schottky plots have a positive slope characteristic with n-type semiconductor behavior [27]. The flat band potentials for CuO-30 min, CuO-60 min and CuO-1800 min electrodes were calculated as 0.03 V, 0.04 V and 0.18 V, respectively. The flat band potential has shifted to a more positive potential with increasing time. This indicates that the bandgap is wider and that much less electrons occur at the semiconductor interface. The CuO-30 min electrode is lower than the flat band potential when compared with other electrodes. The cathodic shift in the flat band potential also provides an easy charge transfer [28].



**Figure 6.** Variation of open circuit potential as a function of time in 1 M KOH electrolyte for CuO-30 min, CuO-60 min, and CuO-1800 min electrodes

Figure 9 shows the cathodic polarization curves recorded for CuO-30 min, CuO-60 min, and CuO-1800 min electrodes at 1 M KOH. As can be

seen, in Figure 9, when the coating time is increased, the open circuit potential shifts to more negative values. At high pH values at the -0.8/-1.2 V potential range, CuO is converted to  $\text{CuO}_2^{2-}$  oxy- anion ( $\text{CuO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{CuO}_2^{2-}$ ) and at high pH  $\text{CuO}_2^{2-}$  is stable. The current density towards cathodic potential greater than -1.4 V indicates hydrogen formation ( $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ ). The volume of hydrogen gas collected using electrodes CuO-30 min, CuO-60 min and CuO-1800 min at -1,8, 2 and

2.2 V in 1 M KOH is presented in Figure 10. At high coating times, the CuO electrode exhibits low catalytic performance for hydrogen evolution. This relatively high amount of  $\text{H}_2$  generated on the CuO nanorod structure can be attributed that the morphology supply conductive channels for electron transport to improve hydrogen evolution and create hydrogen desorption sites [29]. The CuO-30 min electrode having nanorod morphology exhibits higher HER activity for all potentials indicated compared to other electrodes.

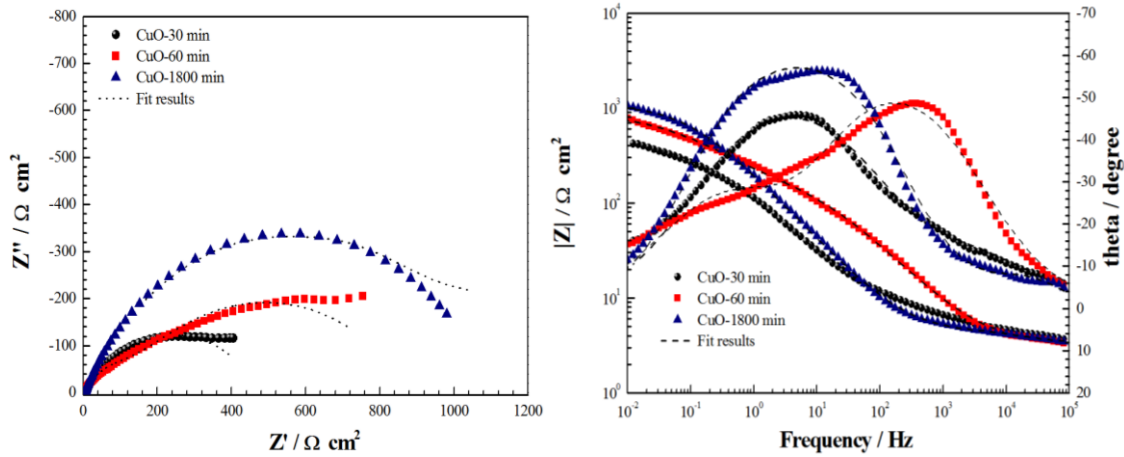


Figure 7. Electrochemical impedance results (Nyquist, Bode and phase angle plots) for CuO-30 min, CuO-60 min, and CuO-1800 min electrodes recorded at OCP in 1M KOH

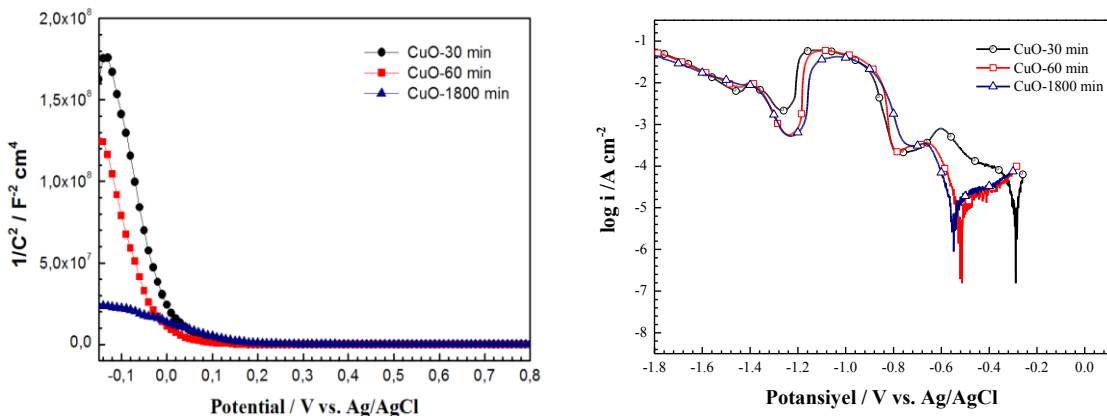


Figure 8. Variations of  $1/C^2$  with applied potential (Mott-Schottky plot) for CuO-30 min, CuO-60 min and CuO-1800 min electrodes

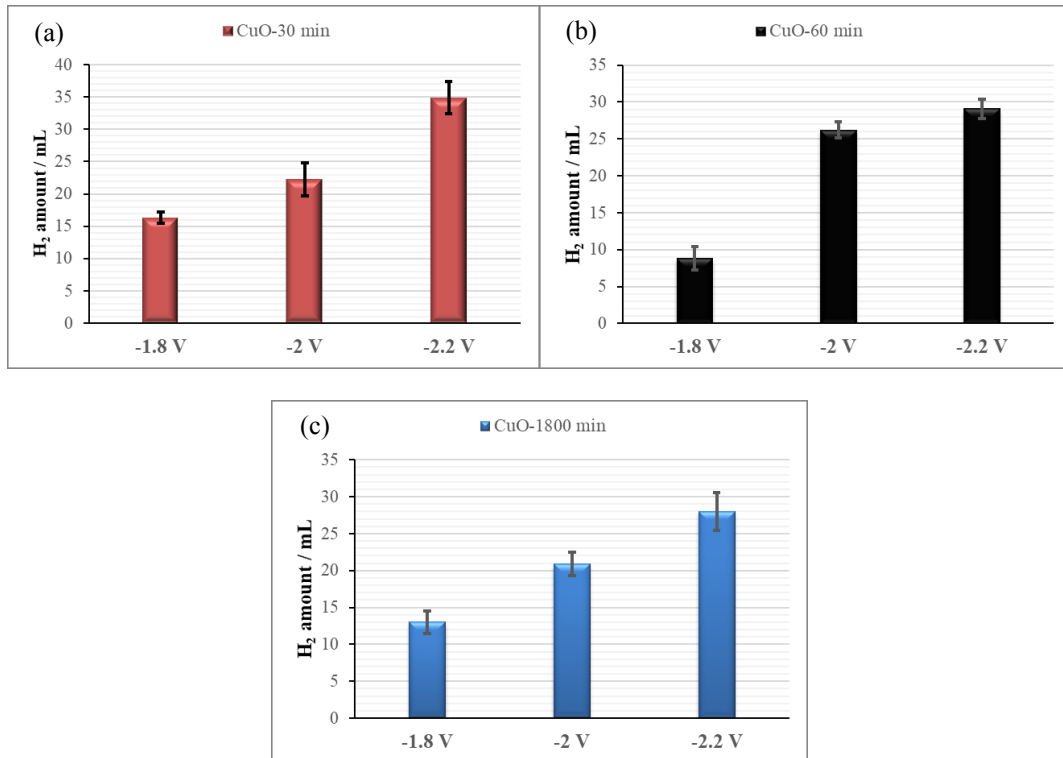
Figure 9. Cathodic polarization curves of for CuO-30 min, CuO-60 min and CuO-1800 min electrodes obtained in 1 M KOH solution at a scan rate of  $0.01 \text{ V s}^{-1}$

In literature, it was reported that hydrogen gas volumes produced on C/NiMn, C/NiMnZn, C/NiMnZn-PtRu and C/NiMnZn-PtPd electrodes by electrolysis technique applying 3.0 V over 1 h were in the range of 102-225 mL cm<sup>-2</sup> [30]. In another study, it was stated that the hydrogen gas volumes formed by electrolysis in 1M KOH at a constant current density of 30 mA over 1 h for the C @ FeZn, C@FeZn/Pt, C@FeZn/Ru electrodes were the range of 54-85 mL cm<sup>-2</sup> [31]. The hydrogen evolution amounts obtained for low cost CuO electrodes at low potentials and short time can be said to have good potential compared to these electrodes reported in the literature.

For CuO-30 min, CuO-60 min and CuO-1800 min electrodes, the energy requirement (Q) and energy efficiency ( $\eta_{HHV}$ ) values of alkali electrolysis at 25, 50 and 100 mA cm<sup>-2</sup> current densities were calculated with the following equations [29,32]:

$$Q = IU.t \quad (5)$$

$$\eta_{HHV} = \frac{283.3kJ/mol}{U.I.t} \quad (6)$$

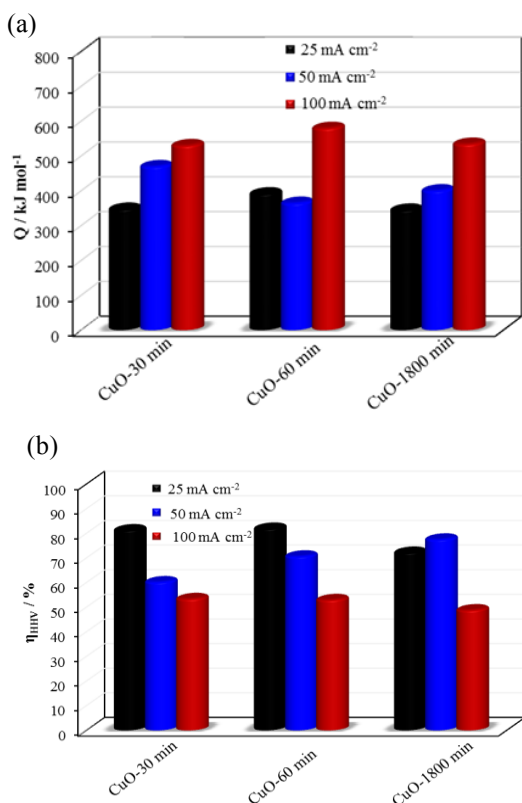


**Figure 10.** Hydrogen evolution amounts for CuO-30 min (a), CuO-60 min (b), and CuO-1800 min (c) electrodes in 1 M KOH solution at different cathodic potentials

Where I is the applied current in Ampere, U is the cell voltage in Voltage and t is time of evolution of a 1 mol of hydrogen in seconds. The results are given in Figure 11. When the values are compared at the current density of 100 mA/cm<sup>2</sup>, the energy consumption is partially increased with increased

coating time. When the energy efficiency was considered, the order of electrocatalytic activity of the studied CuO morphologies was determined as CuO nanorod > CuO nanoflakes > CuO nanoflower. When the results were examined, it was seen that the energy efficiency values of CuO

electrodes were very close to one. The best energy efficiency was found to belong to CuO nanorod morphology. Considering the electrochemical results of CuO electrodes, CuO-30 min electrode was determined as the ideal electrode.



**Figure 11.** Energy consumption (a) and efficiency (b) of alkaline electrolysis at 25, 50, and 100 mA cm<sup>-2</sup> current densities for for CuO-30 min, CuO-60 min, and CuO-1800 min electrodes

#### 4. CONCLUSIONS

Hydrogen, which is regarded as a clean energy carrier, can be produced by many methods. Among these, hydrogen gas production by electrolysis of water is the most suitable. The most important problem limiting the applicability of this method is; It is the cost increase due to the overvoltages that occur in the system. To solve this problem, the appropriate electrode is being investigated.

In the work, CuO nanostructures were synthesized chemical techniques. To determine the appropriate production conditions for the HER reaction, CuO nanostructures were synthesized at the different times. The morphology and structure of CuO nanostructures electrodes were characterized in detail by FE-SEM, EDX, BET and XRD. The nanorod, nanoplate (nanoflakes) and nano-flower-like CuO structures were obtained. Cathodic polarization, impedance measurements and Mott-Schottky analysis were carried out. When the electrochemical results were examined, it was determined that CuO-30 min electrode produced more chemically was more effective than other morphologies.

#### 5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors are thankful to the Kilis 7 Aralık University research fund (Project number: MAP-11491) for their financial support.

#### 6. REFERENCES

1. Sun, Y., Yan, K.P., 2014. Effect of Anodization Voltage on Performance of TiO<sub>2</sub> Nanotube Arrays for Hydrogen Generation in a Two-compartment Photoelectrochemical Cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 39(22), 11368-11375.
2. Wang, J.X., Huang, J., Xie, H.L., Qu, A.L., 2014. Synthesis of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> With Enhanced Photocatalytic Activity for H<sub>2</sub> Evolution by a Simple Method, *International Journal of Hydrogen Energy* 39(12), 6354-6363.
3. Guo, S.Y., Zhao, T.J., Jin, Z.Q., Wan, X.M., Wang, P.G., Shang, J., Han, S., 2015. Self-Assembly Synthesis of Precious-metal-free 3D ZnO Nano/micro Spheres With Excellent Photocatalytic Hydrogen Production from Solar Water Splitting, *Journal of Power Sources* 293, 17-22.
4. Zhou, H., Pan, J.Y., Ding, L., Tang, Y.W., Ding, J., Guo, Q.X., Fan, T., Zhang, D., 2014. Biomass-derived Hierarchical Porous CdS/M/TiO<sub>2</sub> (M = Au, Ag, pt, pd) Ternary Heterojunctions for Photocatalytic Hydrogen



- Evolution, *International Journal of Hydrogen Energy* 39(29), 16293-16301.
5. Cui, X.F., Jiang, G.Y., Zhu, M., Zhao, Z., Du, L.C., Weng, Y.X., Xu, C., Zhang, D., Zhang, Q., Wei, Y., Duan, A., Liu, J., Gao, J., 2013. TiO<sub>2</sub>/CdS Composite Hollow Spheres With Controlled Synthesis of Platinum on the Internal Wall for the Efficient Hydrogen Evolution, *International Journal of Hydrogen Energy* 38(22), 9065-9073.
  6. Harun, N.F.A.B., bin Mohd, Y., Pei, L.Y., Chin, L.Y., 2018. Fabrication of Tungsten Trioxide-loaded Titania Nanotubes as a Potential Photoanode for Photoelectrochemical Cell, *International Journal of Electrochemical Science* 13(5), 5041-5053.
  7. Townsend, T.K., Sabio, E.M., Browning, N.D., Osterloh, F.E., 2011. Photocatalytic Water Oxidation with Suspended Alpha-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles-effects of Nanoscaling, *Energy & Environmental Science* 4(10), 4270-4275.
  8. Berglund, S.P., Flaherty, D.W., Hahn, N.T., Bard, A.J., Mullins, C.B., 2011. Photoelectrochemical Oxidation of Water Using Nanostructured BiVO<sub>4</sub> Films, *Journal of Physical Chemistry, C* 115(9), 3794-3802.
  9. Wu, Q.Y., Diao, P., Sun, J., Xu, D., Jin, T., Xiang, M., 2015. Draining the Photoinduced Electrons Away from an Anode: the Preparation of Ag/Ag<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> Composite Nanoplate Photoanodes for Highly Efficient Water Splitting, *Journal of Materials Chemistry A* 3(37), 18991-18999.
  10. Chen, Z.B., Jaramillo, T.F., Deutsch, T.G., Kleiman-Shwarsstein, A., Forman, A.J., Gaillard, N., Takanabe, K., Heske, C., Sunkara, M.K., McFarland, E.W., Domen, K., Miller, E., Turner, J.A., Dinh, H.N., 2010. Accelerating Materials Development for Photoelectrochemical Hydrogen Production: Standards for Methods, Definitions, and Reporting Protocols, *Journal of Materials Research* 25(1), 3-16.
  11. Khaselev, O., Turner, J.A., 1998. A Monolithic Photovoltaic-photoelectrochemical Device for Hydrogen Production Via Water Splitting, *Science* 280(5362), 425-427.
  12. Gao, L., Cui, Y.C., Wang, J., Cavalli, A., Standing, A., Vu, T., Verheijen, M.A., Haverkort, J.E.M., Bakkers, E., Notten, P.H.L., 2014. Photoelectrochemical Hydrogen Production on InP Nanowire Arrays with Molybdenum Sulfide Electrocatalysts, *Nano Letters* 14(7), 3715-3719.
  13. McKone, J.R., Pieterick, A.P., Gray, H.B., Lewis, N.S., 2013. Hydrogen Evolution from Pt/Ru-Coated p-Type WSe<sub>2</sub> Photocathodes, *Journal of the American Chemical Society* 135(1), 223-231.
  14. Dominey, R.N., Lewis, N.S., Bruce, J.A., Bookbinder, D.C., Wrighton, M.S., 1982. Improvement of Photo-Electrochemical Hydrogen Generation by Surface Modification of P-Type Silicon Semiconductor Photo-Cathodes, *Journal of the American Chemical Society* 104(2), 467-482.
  15. Huang, Q., Li, Q., Xiao, X.D., 2014. Hydrogen Evolution from Pt Nanoparticles Covered p-Type CdS:Cu Photocathode in Scavenger-Free Electrolyte, *Journal of Physical Chemistry C* 118(5), 2306-2311.
  16. Nancheva, N., Docheva, P., Misheva, M., 1999. Defects in Cu and Cu-O Films Produced by Reactive Magnetron Sputtering, *Materials Letters* 39(2), 81-85.
  17. Mu, C., He, J.H., 2011. Confined Conversion of CuS Nanowires to CuO Nanotubes by Annealing-induced Diffusion in Nanochannels, *Nanoscale Research Letters* 6.
  18. Shen, X.P., Liu, H.J., Pan, L., Chen, K.M., Hong, J.M., Xu, Z., 2004. An Efficient Template Pathway to Synthesis of Ordered Metal Oxide Nanotube Arrays using Metal Acetylacetonates as Single-source Molecular Precursors, *Chemistry Letters* 33(9), 1128-1129.
  19. Chaudhary, A., Barshilia, H.C., 2011. Nanometric Multiscale Rough CuO/Cu(OH)<sub>2</sub> Superhydrophobic Surfaces Prepared by a Facile One-Step Solution-Immersion Process: Transition to Superhydrophilicity with Oxygen Plasma Treatment, *Journal of Physical Chemistry C* 115(37), 18213-18220.
  20. Schlur, L., Bonnot, K., Spitzer, D., 2014. Synthesis of Cu(OH)<sub>2</sub> and CuO Nanotubes Arrays on a Silicon Wafer, *Rsc Advances* 5(8), 6061-6070.

21. Ke, X., Zhou, X., Gao, H., Hao, G.Z., Xiao, L., Chen, T., Liu, J., Jiang, W., 2018. Surface Functionalized Core/shell Structured CuO/Al Nanothermite with Long-term Storage Stability and Steady Combustion Performance, *Materials & Design* 140(15), 179-187.
22. Zhang, Q.B., Zhang, K.L., Xu, D.G., Yang, G.C., Huang, H., Nie, F.D., Liu, C., Yang, S., 2014. CuO Nanostructures: Synthesis, Characterization, Growth Mechanisms, Fundamental Properties, and Applications, *Progress in Materials Science* 60(1), 208-337.
23. Guo, X., Diao, P., Xu, D., Huang, S., Yang, Y., Jin, T., Wu, Q., Xiang, M., Zhang, M., 2014. CuO/Pd Composite Photocathodes for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction, *International Journal of Hydrogen Energy* 39(15), 7686-7696.
24. Li, Z.Z., Xin, Y.M., Zhang, Z.H., Wu, H.J., Wang, P., 2015. Rational Design of Binder-free Noble Metal/metal Oxide Arrays with Nanocauliflower Structure for Wide Linear Range Nonenzymatic Glucose Detection, *Scientific Reports* 5, 10617.
25. Espejo, E.M.A., Balela, M.D.L., 2017. Facile Synthesis of Cupric Hydroxide and Cupric Oxide on Copper Foil for Potential Electrochemical Applications, 7<sup>th</sup> International Conference on Key Engineering Materials (Ickem 2017) 201.
26. Amin, M.A., Fadlallah, S.A., Alosaimi, G.S., 2014. In Situ Aqueous Synthesis of Silver Nanoparticles Supported on Titanium as Active Electrocatalyst for the Hydrogen Evolution Reaction, *International Journal of Hydrogen Energy* 39(34), 19519-19540.
27. Mahmood, A., Tezcan, F., Kardas, G., 2017. Photoelectrochemical Characteristics of CuO Films with Different Electrodeposition Time, *International Journal of Hydrogen Energy* 42(36), 23268-23275.
28. Hao, X.Q., Wang, Y.C., Zhou, J., Cui, Z.W., Wang, Y., Zou, Z.G., 2018. Zinc Vacancy-promoted Photocatalytic Activity and Photostability of ZnS for Efficient Visible-light-driven Hydrogen Evolution, *Applied Catalysis B-Environmental* 221, 302-311.
29. Herraiz-Cardona, I., Ortega, E., Vazquez-Gomez, L., Perez-Herranz, V., 2011. Electrochemical Characterization of a NiCo/Zn Cathode for Hydrogen Generation, *International Journal of Hydrogen Energy* 36(18), 11578-11587.
30. Yuce, A.O., Doner, A., Kardas, G., 2013. NiMn Composite Electrodes as Cathode Material for Hydrogen Evolution Reaction in Alkaline Solution, *International Journal of Hydrogen Energy* 38(11), 4466-4473.
31. Farsak, M., Telli, E., Yuce, A.O., Kardas, G., 2017. The Noble Metal Loading Binary Iron-zinc Electrode for Hydrogen Production, *International Journal of Hydrogen Energy* 42(10), 6455-6461.
32. Nikolic, V.M., Tasic, G.S., Maksic, A.D., Saponjic, D.P., Miulovic, S.M., Kaninski, M.P.M., 2010. Raising Efficiency of Hydrogen Generation from Alkaline Water Electrolysis-Energy Saving, *International Journal of Hydrogen Energy* 35(22), 12369-12373.

## Heat Conduction Analysis of Two-Dimensional Anisotropic Plate

Durmuş YARIMPABUÇ<sup>1</sup>, Ertuğrul CİHAN<sup>2</sup>, Kerimcan ÇELEBİ<sup>\*3</sup>,  
Mehmet EKER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Matematik Bölümü, Osmaniye

<sup>2</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
Osmaniye

<sup>3</sup>Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 20.02.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Abstract

The heat conduction of a two dimensional anisotropic plate with non-homogeneous general boundary conditions is solved by using ANSYS Fluent in the cartesian coordinate system. It is assumed that the thermal conductivity and heat generation of the material arbitrarily change in the direction of the two space variables. Under these conditions, a variable coefficient differential equation is obtained. Analytical solutions of such equations cannot be obtained except for some simple material functions. The variable coefficient differential equation, which includes the heat conduction coefficient and volumetric heat generation depending on the two space variables and non-homogeneous boundary conditions, is handled numerically by ANSYS Fluent user-defined function (UDF). The accuracy of the numerical method is demonstrated by comparing analytical and numerical solutions using simple material functions.

**Keywords:** Anisotropic heat conduction, Analytical solution, Finite element method, UDF

### İki Boyutlu Anizotropik Plakanın Isı İletim Analizi

#### Öz

Homojen olmayan genel sınır koşullarına sahip iki boyutlu anizotropik bir plakanın ısı iletim problemi, kartezyen koordinat sisteminde ANSYS Fluent kullanılarak çözülmüştür. Malzemenin termal iletkenliği ve ısı üretiminin keyfi olarak iki uzay değişkeni yönünde değiştiği varsayılmıştır. Bu koşullar altında sistemi modelleyen değişken katsayılı diferansiyel denklem elde edilir. Bu tür denklemlerin analitik çözümleri, bazı basit malzeme fonksiyonları dışında elde edilemez. İki uzay değişkenine bağlı olarak değişen ısı iletim katsayısı ve hacimsel ısı üretimi ile homojen olmayan sınır koşullarını içeren değişken katsayılı diferansiyel denklem ANSYS Fluent kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF) ile sayısal olarak ele alınmıştır. Sayısal yöntemin doğruluğu, basit malzeme fonksiyonları kullanılarak analitik ve sayısal çözümler karşılaştırılarak gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Anizotropik Isı iletimi, Analitik çözüm, Sonlu elemanlar yöntemi, UDF

---

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Kerimcan ÇELEBİ, [kcelebi@cu.edu.tr](mailto:kcelebi@cu.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

Anisotropic materials whose material properties change with the direction can be natural and synthetic such as, crystals, wood, sedimentary rocks, metals that have undergone heavy cold pressing, laminated sheets, cables, heat shielding materials for space vehicles and fiber reinforced composite structures. In aforementioned materials, thermal conductivity can change with the location of the material as well. The change in material properties such as thermal conductivity depends on the location throughout the medium are also examples of anisotropic materials which results in governing differential equations with variable coefficients. Due to the difficulties associated with the solution of these heat transfer problems with variable coefficients, simplifying assumptions are usually made. For example, in the case of materials that have thermal conductivity which varies slightly with location, constant thermal conductivity is generally assumed. This assumption leads errors in solution if the thermal conductivity of the material is affected greatly with location change throughout the material. Therefore, modelling and simulating temperature distribution for such problems linearities caused by location-dependent thermal conductivity have to be accounted by the numerical computation.

There are various methods available in the literature to handle heat transfer problems with variable coefficients. The most commonly used engineering methods are Finite Difference Method (FDM) [1] and Finite Element Methods (FEM) [2]. The biggest advantage FEM over the FDM is its capability of handling irregular geometries and size can be changed over the region. Another method usually utilized in this kind of analyses is the (Boundary Element Method) BEM [3]. In this method the numerical solution of the continuum is performed with a reduction of dimensionality of the problem. The efficiency of BEM is that the number of the resulting simultaneous equations depends only upon the discretization of the boundary of the domain and that technique can be employed to represent the solution over the boundary elements. In this way, the problem can

be treated with one less dimension. The most common used engineering solution for the linear heat transfer problem is FEM.

Ma et al. [4] and [5] have proposed an analytical solution of heat conduction problem for an anisotropic medium; they employed a linear transformation to convert the original anisotropic problem to an equivalent isotropic problem with a same geometrical configuration. The accuracy improvement of the discontinuous boundary elements over the continuous boundary elements has been well established numerically in Mera et al [6], Florez and Power [7] and Tadeu and Antonio [8]. The anisotropy increases the number of heat conduction constants, which renders the derivation of fundamental solutions as difficult even in a homogeneous case. Sladek et al. [8] proposed the meshless method based on the local Petrov-Galerkin approach to solve stationary and transient heat conduction problems in 2-D for anisotropic FGM. Wang et al. [9] developed a new meshless method based on the standard Laplacian operator and radial basis functions (RBFs) in order to solve steady-state heat conduction problems with arbitrarily spatially varying thermal conductivity in isotropic and anisotropic materials.

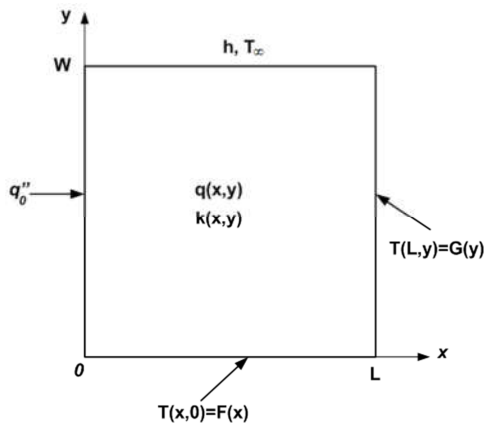
In the scientific literature, many analytical works have focused on relevant anisotropic heat conduction problems. A linear coordinate transformation is well-known as it can be applied to solve the heat conduction problems for a thin-layer medium and multi-layered media with anisotropic properties [11-16]. The effect of the contact resistance on the steady-state temperature in a multidimensional and multilayer body was studied by Haji-Sheikh et al. [12]. However, analytical treatments have been restricted within quite special or simple cases, because of the solution, especially for more complex geometry, poses mathematical difficulties. The boundary element method (BEM) was used for solving the multidimensional and multilayer anisotropic heat conduction problem by adopting the direct domain mapping and the coordinate transforms method [13]. The advantage of this approach is that the anisotropic problem can be efficiently and accurately solved with any numerical methods in

the literature, such as the finite difference method or the boundary element method for isotropic potential theory [14-16]. The coordinate transforms method can also efficiently be used for analysis of the anisotropic microscale heat transfer.

In this paper, numerical method with location dependent heat source and non-homogeneous boundary condition fields was extended to obtain solution of anisotropic linear heat transfer problems with variable coefficients. This study involved development and implementation of numerical algorithms and software. The research is focused on governing differential equations with variable coefficients caused by location dependency of thermal conductivity and volumetric heat generation. Analytical solution for simple material functions available in literature [17] are used to validate the numerical model.

## 2. GOVERNING EQUATION

Two-dimensional steady state conduction in a rectangular plate  $L \times W$  at a uniform volumetric rate is considered for the thermal conductivity and energy generation varies arbitrary in two spatial directions shown in Figure 1.



**Figure 1.** The geometry of 2D steady state conduction in a rectangular plate  $L \times W$

This non-homogeneous second order partial differential equation with variable coefficient is governed by Equation 1.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(x,y) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(x,y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q(x,y) = 0 \quad (0 < x < L, 0 < y < W) \quad (1)$$

with nonhomogeneous boundary conditions Equation 2:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x}(0,y) &= \frac{q_0'}{k(x,y)}; & T(L,y) &= G(y), \\ T(x,0) &= F(x); & \frac{\partial T}{\partial y}(x,W) &= -\frac{h}{k(x,W)} [T(x,W) - T_\infty] \end{aligned} \quad (2)$$

where  $k(x,y), q(x,y)$  thermal conductivity and heat generation respectively. In the treatment, functions of spatial variables in three different case are assumed.

**Case-1:** Thermal conductivity and heat generation are varied exponentially in one spatial variables Equation 3a,

$$k(y) = k_0 e^{-\gamma \frac{y}{W}}, q(y) = q_0 e^{-\gamma \frac{y}{W}} \quad (3a)$$

**Case-2:** Thermal conductivity and heat generation are varied exponentially in two spatial variables, Equation 3b,

$$k(x,y) = k_0 e^{\frac{\alpha x}{L} - \gamma \frac{y}{W}}, q(x,y) = q_0 e^{\frac{\beta x}{L} - \gamma \frac{y}{W}} \quad (3b)$$

**Case-3:** Thermal conductivity and heat generation are varied exponentially and in power law, respectively in two spatial variables Equation 3c,

$$k(x,y) = k_0 e^{-\gamma \frac{x}{L} - \gamma \frac{y}{W}}, q(x,y) = q_0 x^3 (1-x) y^3 (1-y) \quad (3c)$$

where,  $k_0$  and  $q_0$  are the thermal conductivity and internal heat generation at the ambient temperature,  $T_\infty$ . And,  $\alpha, \beta, \gamma$  represents the variations of the thermal conductivity and internal heat generation.

For simple representation, it is assumed that thermal conductivity and heat generation are varied exponentially in one spatial direction (Case-1). Therefore, the governing equation by

using the following dimensionless variables Equation 4,

$$\eta = \frac{x}{L}, \xi = \frac{y}{W}, \theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_{\max} - T_{\infty}} \quad (4)$$

renders eq. (1) in the form of nonhomogeneous ordinary differential equations with constant coefficients Equations 5 and 6,

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} - c^2 \gamma \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + c^2 \frac{\partial \theta}{\partial \xi^2} + d = 0 \quad (0 < \eta < 1, 0 < \xi < 1) \quad (5)$$

where

$$c = \frac{L}{W}, d = \frac{q_0 L^2}{k_0 (T_{\max} - T_{\infty})} \quad (6)$$

The non-dimensional nonhomogeneous boundary conditions turned into the following form Equations 7 and 8,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \eta}(0, \xi) &= -ae^{\gamma \xi}; & \theta(1, \xi) &= g(\xi), \\ \theta(\eta, 0) &= f(\eta); & \frac{\partial \theta}{\partial \xi}(\eta, 1) &= -e^{\gamma} Bi \theta(\eta, 1) \end{aligned} \quad (7)$$

with

$$Bi = \frac{hL}{k_0}, a = \frac{q_0 L}{k_0 (T_{\max} - T_{\infty})} \quad (8)$$

where  $Bi$  is the Biot number. It is emphasized that the main aim of this paper is to obtain numerical solution of two dimensional thermal conduction equation with the given most general nonhomogeneous boundary conditions.

### 3. NUMERICAL METHOD

The governing partial differential equation mentioned earlier is solved by using the commercially available ANSYS FLUENT software. The foundation of physical problem, meshing the domain and application of the boundary conditions are all done with the preprocessor of the same software ANSYS ICEM CFD. It is well-known that the aforementioned software utilizes the widely used finite element and finite volume modeling for the heat transfer

and mechanics. The results are comprehended in the post processor module of the ANSYS Workbench CFD software.

Although the ANSYS FLUENT is very capable of solving physical problems, in some cases the standard interface cannot be programmed to address the problems with complicate boundary conditions and variable parameters such as the problem studied in this paper. Due to the customized boundary conditions presented in this paper, a User Defined Function [19] is inevitable to be employed for numerical solution. The UDF is a C routine programmed by the user which can be dynamically linked with the solver. The conduction differential equation with location dependent heat conduction coefficient, volumetric heat generation and nonhomogeneous boundary conditions require the employment of UDFs by developing codes in C. The simultaneous processing of the UDFs with FLUENT model deploys accurate results for the demanded boundary temperature profile and the heat flux. The input parameters for UDFs were taken as  $\alpha=2, \beta=4, \gamma=0.5, L=0.2, W=0.2, T_{\max}=500, T_{\infty}=300, k_0=0.2$ .

#### 3.1. Mesh Sensitivity Analysis

The numerical solutions are run for five different mesh densities to examine the mesh sensitivity of the described simulations. The mesh is refined by increasing the number of divisions of edges of the body in  $x$  and  $y$  directions. In this study, the edges of the body are divided by 10x10, 20x20, 40x40, 80x80, 160x160 and 320x320 in order to analyze the mesh sensitivity of the problem by comparing the heat transfer results at the top ( $\xi=1$ ) boundary. The results are monitored in Table 1. A maximum residual reduction factor of  $10^{-9}$  for the heat conduction equation was used to monitor the convergence of iterative solution. The discretization error in the numerical solutions is calculated in the following form [18] (Equation 9).

$$\varepsilon_h \approx \frac{\theta_h - \theta_{2h}}{2^p - 1} \quad (9)$$

The order of the scheme coefficient  $p$  in eq.(20) is given by following relation (Equation 10):

$$p = \frac{\log\left(\frac{\varnothing_{2h} - \varnothing_{4h}}{\varnothing_h - \varnothing_{2h}}\right)}{\log(2)} \quad (10)$$

The Richardson extrapolation suggests that an approximation of the exact solution  $\phi$  is more accurate than the solution of the finest mesh  $\varnothing_h$  by adding the discretization error  $\epsilon_h$ . The

approximation of exact solution is expressed as following (Equation 11):

$$\phi = \varnothing_h + \epsilon_h \quad (11)$$

The relative discretization error is given in the Equation 12 below and calculated by the heat flux given in Table 2.

$$\Psi(\%) = \frac{\epsilon_h}{\varnothing_h + \epsilon_h} \times 100. \quad (12)$$

**Table 1.** Q(W/m<sup>2</sup>), the amount of heat transferred at the top ( $\xi = 1$ ) boundary

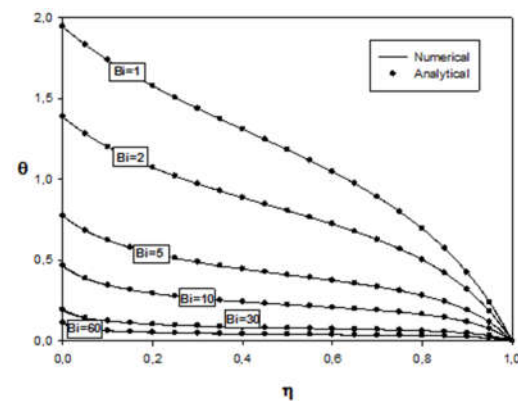
n	Number of Cell	“Bi=1”	Bi=5	Bi=10	Bi=30	Bi=60
10×10	100	222.14	376.53	416.37	449.38	458.78
20×20	400	224.33	390.94	434.12	470.20	480.59
40×40	1600	225.07	398.69	443.82	481.68	492.64
80×80	6400	225.45	402.87	449.09	487.95	499.25
160×160	25600	225.65	405.07	451.87	491.28	502.76
320×320	102400	225.75	406.19	453.29	492.98	504.56
Analytical	225.90	407.39	454.85	495.25	507.09	

**Table 2.** Relative discretization error for a=1.5 and d=5 at the top ( $\xi=1$ ) boundary

	Bi=1	Bi=5	Bi=10	Bi=30	Bi=60
$\varnothing_h$	225.75	406.19	453.29	492.98	504.56
$p$	1.1171	0.9721	0.9678	0.9687	0.9624
$\epsilon_h$	0.0814	1.1648	1.4863	1.7786	1.9005
$\Phi$	225.83	407.35	454.77	494.76	506.47
$\Psi(\%)$	0.03603	0.2859	0.3268	0.3595	0.3752

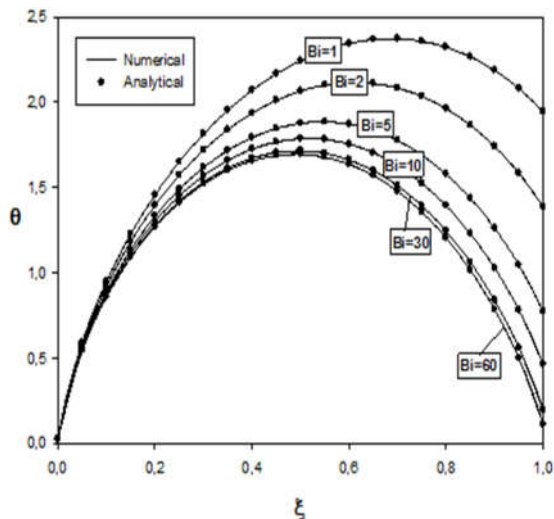
#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The temperature distribution for the case that thermal conductivity and volumetric heat generation are varied exponentially in one spatial variables are presented in Figure 2-7. In these figures, the results obtained in the numerical results are compared with the analytical study of Yarimpabuç et al. [17], and It can be seen from Figure 2-7 that the numerical results are in a good agreement with the analytical results and both solutions satisfy boundary conditions imposed in the problem.



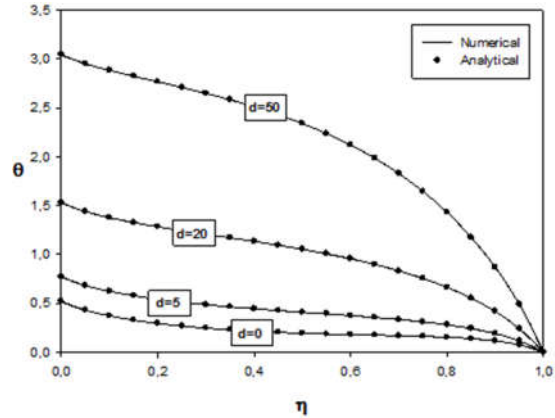
**Figure 2.** Dimensionless temperature distribution for different Biot number at the top ( $\xi=1$ ) boundary

The variation of temperature in the body for various  $Bi$  numbers is displayed in Figure 2–3 with  $a=1.5$  and  $d=5$ . In Figure 2 numerical and analytical solutions are presented for different values of  $Bi=1, 2, 5, 10, 30$  and  $60$ . The numerical and analytical solutions are coinciding accurately for all the  $Bi$  numbers. As the Biot number increases the heat transfer increases yielding the temperature on top wall to approach the ambient temperature. On the other hand, temperature of the same wall increases due to the volumetric heat generation and heat flux while  $Bi$  number is decreasing. However at point  $(\eta=1, \xi=1)$  the temperature is found to be  $\theta = 0$  which satisfies the BC's described in problem definition for all  $Bi$  numbers. It is also shown that dimensionless temperature value approaches to zero as  $Bi$  number goes to infinity.



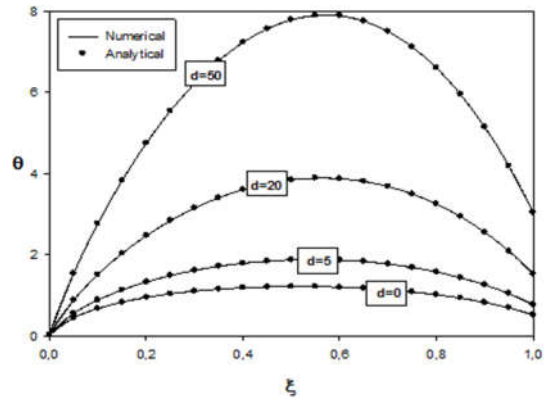
**Figure 3.** Dimensionless temperature distribution for different Biot number at the left ( $\eta=0$ ) boundary

The dimensionless temperature distribution along left wall ( $\eta = 0$ ) for  $Bi = 1, 2, 5, 10, 30$  and  $60$  with constants values of  $a=1.5$  and  $d=4$  is provided in Figure 3. It is clearly seen that dimensionless temperature  $\theta$  becomes  $\xi = 0$  which is expected because it is imposed as the boundary condition in the problem definition. The dimensionless temperature  $\theta$  distribution tends to have lower value while  $Bi$  number increases.



**Figure 4.** Dimensionless temperature distribution at the top ( $\xi=1$ ) boundary

The change of dimensionless temperature distributions for assorted dimensionless volumetric heat generation values  $d=0, 5, 20$  and  $50$  with  $Bi=5$  and  $a=1.5$  is shown in Figure 4-5. In Figure 4, the temperature distribution of the medium considerably increases as the volumetric heat generation increases. However, when volumetric heat generation is neglected ( $d=0$ ) in the medium, temperature seems not to be affected substantially for  $Bi=5$  and  $a=1.5$ .



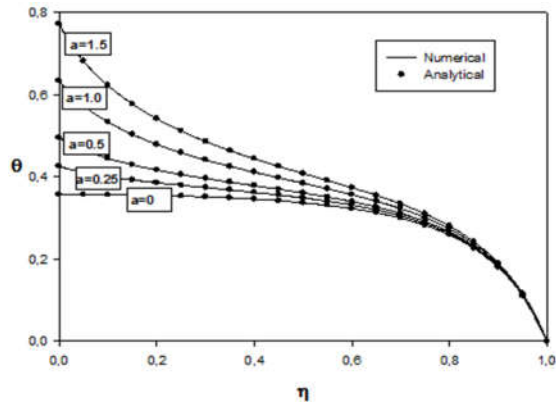
**Figure 5.** Dimensionless temperature distribution at the left ( $\eta=0$ ) boundary

In Figure 5, the temperature distributions along left wall ( $\eta = 0$ ) with constant Biot number  $Bi=5$  and dimensionless heat flux  $a=1.5$  for dimensionless volumetric heat generations  $d=0, 5, 20$  and  $50$  are illustrated. The temperature along the wall increases remarkably as the volumetric heat



generation is increased with constant heat flux. Similar to Figure 3 the temperature along the wall reaches to a maximum and then decreases. According to Figure 5 the maximum temperature value happens to be at the middle of the wall. The temperature alters slightly when heat generation is not deployed.

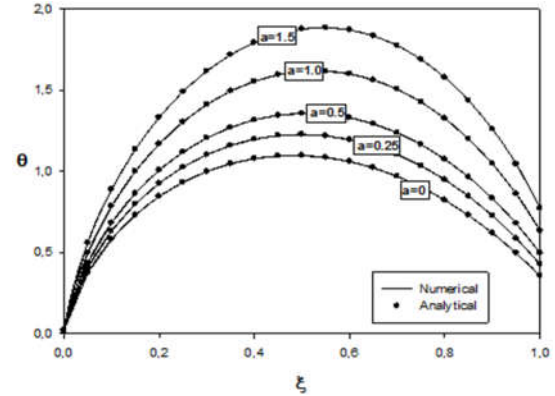
Effect of dimensionless heat flux ( $a=0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5$ ) on temperature for constant  $Bi$  number ( $Bi=5$ ), volumetric heat generation ( $d=5$ ) is plotted in Figure 6-7.



**Figure 6.** Dimensionless temperature distribution at the top ( $\xi=1$ ) boundary

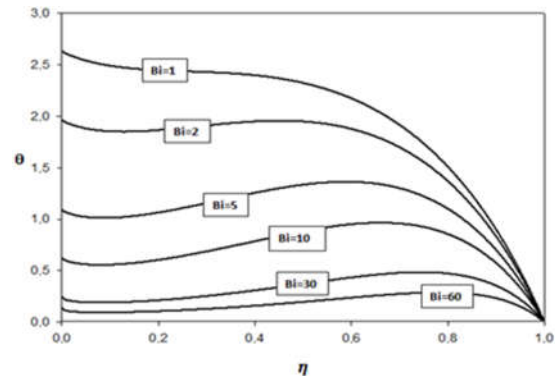
In Figure 6, the temperature distribution on top wall ( $\xi=1$ ) decreases as the heat flux value decreases. The temperature does not differ along the wall of interest when the heat flux does not exist. Similar to the other plots, the temperature  $\xi=1$  vanishes to zero satisfying the enforced boundary conditions. It is shown that the volumetric heat generation dominates the temperature distribution along the top wall over the heat flux. The temperature distribution for the left wall for numerous dimensionless heat flux ( $a=0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5$ ) is plotted in Figure 7 for constant  $Bi$  number ( $Bi=5$ ) and volumetric heat generation ( $d=5$ ). According to the figure, the temperature distribution on the wall tends to shift upward as the heat flux is increased. The temperature  $\theta$  becomes zero assuring the boundary conditions employed in the problem definition  $\xi=0$ . However at  $\xi=1$ , the dimensionless temperature values depend on the Biot number

employed on the top wall. The temperature at  $\xi=1$  is anticipated to become zero approaching to the ambient temperature.



**Figure 7.** Dimensionless temperature distribution at the left ( $\eta=0$ ) boundary

In Figure 8-9, the results of numerical solution of the problem for the case that thermal conductivity and volumetric heat generation are varied exponentially in two spatial variables. The dimensionless temperature distribution of the top ( $\xi=1$ ) and left wall ( $\eta=0$ ) with respect to the  $Bi$  number for a constant  $a=1.5$  and  $d=5$  is provided in Figure 8 and 9 respectively. According to results presented in Figure 8, the temperature of the top wall approaches to ambient temperature for higher  $Bi$  numbers. Similarly, in Figure 9 the temperature distributions of the left wall increase as the  $Bi$  number decreases due to decrease of the heat transfer from wall to the environment.



**Figure 8.** Dimensionless temperature distribution at the top ( $\xi=1$ ) boundary

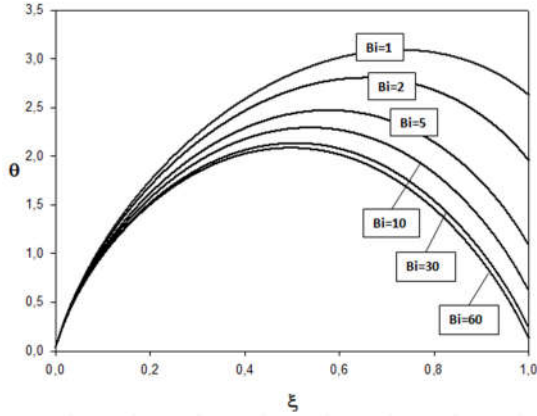


Figure 9. Dimensionless temperature distribution at the left ( $\eta=0$ ) boundary

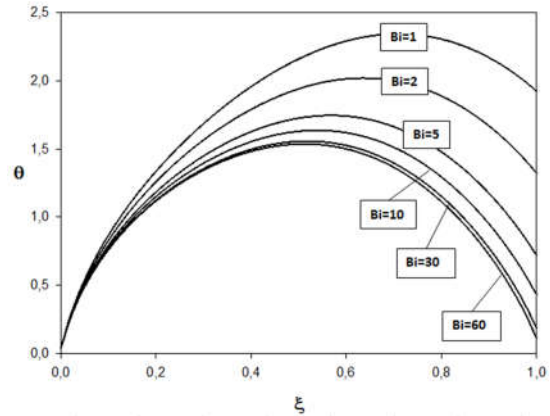


Figure 11. Dimensionless temperature distribution at the left ( $\eta=0$ ) boundary

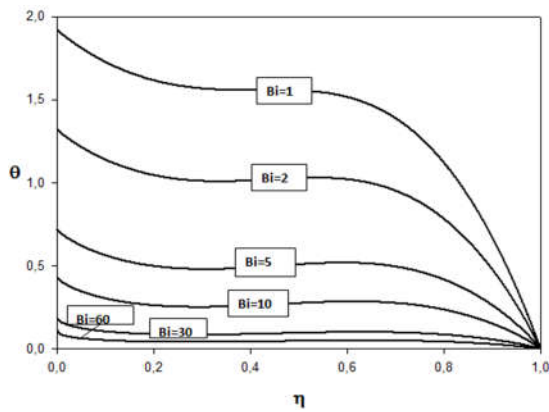


Figure 10. Dimensionless temperature distribution at the top ( $\xi=1$ ) boundary

In addition, the results of numerical solution of the problem for the case that thermal conductivity changed exponentially, and internal heat generation changed with power law in two spatial variables are presented in Figure 10-11. The dimensionless temperature distribution of the top and left wall with respect to the  $Bi$  number for a constant  $a=1.5$  and  $d=5$  is provided in Figure 10 and 11 respectively. According to results presented in Figure 10, as  $Bi$  number increases, the temperature of the top wall comes close to the ambient temperature. Furthermore, in Figure 11 the temperature of the left wall increases as the  $Bi$  number decreases due to developing resistance against heat transfer from wall to the environment.

## 5. CONCLUSION

In this study heat conduction equation of an anisotropic medium with location dependent heat generation and nonhomogeneous boundary conditions is solved numerically. The numerical solution of the defined problem is performed in the commercially available software ANSYS Fluent. The heat conduction coefficient, location dependent heat generation and nonhomogeneous boundary conditions are imposed by the help of ANSYS Fluent UDF.

The results obtained agree with analytical solution remarkably. The error margin remains to be in the vicinity of 0.5%. The temperature distributions of the model for dimensionless numbers are explored and they are consistent with each other. According to the results presented, the temperature distribution is governed greatly by the heat generation rather than heat flux. The proposed models are capable of solving and analyzing of heat conduction equations for different and anisotropic materials.

## 6. REFERENCES

1. Zedan, M., Schneider, G.E., 1982. A Physical Approach to the Finite-difference Solution of the Conduction Equation in Generalized Coordinates, Num.H Trans., Part A, 5(1), 1-19.

2. Comini, G., Guidice, S., Lewis, R.W., Zienkiewicz, O.C., 1974. Finite Element Solution on Nonlinear Heat Conduction Problems with Special Reference to Phase Change, *Int. J. for Num. Methods in Eng.*, 8, 613-624.
3. Wrobel, L.C., Aliabadi, M.H., 2002. *The Boundary Element Method: Applications in Solids and Structures*, 2 Volume Set, John Wiley and Sons, USA, 1066.
4. Hsieh, M.H., Ma, C.C., 2002. Analytical Investigations for Heat Cond. Prob. in Anisotropic Thin-layer Media with Embedded Heat Sources, *Int.J.H.M.Trans.*, 45(20), 4117-4132.
5. Ma, C.C., Chang, S.W., 2004. Analytical Exact Solutions of Heat Conduction Problems for Anisotropic Multi-layered Media, *Int. J. Heat Mass Trans.*, 47(8-9), 1643-1655.
6. Mera, N.S., Elliot, L., Ingham, D.B., Lesnic, D., 2001. A Comparison of Boundary Element Method Formulations for Steady State Anisotropic Heat Conduction Problems, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 25(2), 115-28.
7. Florez, W.F., Power, H., 2001. Comparison Between Continuous and Discontinuous Boundary Elements in the Multidomain Dual Reciprocity Method for the Solution of the Two-dimensional Navier-Stokes Equations, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 25(1), 57-69.
8. Tadeu, A., Antonio, J., 2000. Use of Constant, Linear and Quadratic Boundary Elements in 3D Wave Diffraction Analysis, *Eng. Anal. Bound. Elem.*, 24(2), 131-144.
9. Wang, H., Qin, Q.H., Kang, Y.L., 2005. A New Meshless Method for Steady-state Heat Conduction Problems in Anisotropic and Inhomogeneous Media, *Arc. App. Mech.*, 74(8), 563-579.
10. Sladek, J., Sladek, V., Atluri, S.N., 2004. Meshless Local Petrov-Galerkin Method for Heat Conduction Problem in an Anisotropic Medium, *CMES, Comput Model Eng. Sci.*, 6(3), 309-318.
11. Hsieh, M.H., Ma, C.C., 2002. Analytical Investigations for Heat Conduction Problems in Anisotropic Thin-layer Media with Embedded Heat Sources, *Int.J.H.M.Trans.*, 45(20), 4117-4132.
12. Haji-Sheikh, A., Beck, J.V., Agonafer, D., 2003. Steady-state Heat Conduction in Multi-layer Bodies, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46(13), 2363-2379.
13. Shiah, Y.C., Tan, C.L., 1997. BEM Treatment of Two-dimensional Anisotropic Field Problems by Direct Domain Mapping, *Engineer. Anly. Bound. Element*, 20(4), 347-351.
14. Shiah, Y.C., Tan, C.L., 2004. BEM Treatment of Three-dimensional Anisotropic Field Problems by Direct Domain Mapping, *Engineer. Anly. Bound. Element*, 28(1), 43-52.
15. Shiah, Y.C., Hwanh, P.W., Yang, R.B., 2006. Heat Conduction in Multiply Adjoined Anisotropic Media with Embedded Point Heat Sources, *J. Heat Transfer*, 128(2), 207-214.
16. Shiah, Y.C., Lee, B.J., 2011. Boundary Element Modeling of 3-D Anisotropic Heat Conduction Involving Arbitrary Volume Heat Source, *Math.Comp.Mod.*, 54(9-10), 2392-2402.
17. Yarımabuç, D., Cihan, E., Eker, M., Celebi, K., 2016. Analytical and Numerical Solutions of Anisotropic Heat Conduction Problems with Location-dependent Heat Generation, 1<sup>st</sup> International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), 1673-1680, Paper ID:496.
18. Ferziger, J.H., Peric, M., 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Third Ed. Springer, 431, USA.
19. ANSYS, Inc., 2009. *Ansys Fluent 12.0 UDF Manual*, 2070.



## **Feeding Electricity Ring Grids with Minimum Interruption Using Fuzzy Logic Based Relay Coordination Scenarios Under Interruption Conditions**

**Mehmet Uğraş CUMA<sup>\*1</sup>, İrfan DEMİRAY<sup>1</sup>, Murat Mustafa SAVRUN<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Çukurova University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adana

<sup>2</sup>Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adana

Geliş tarihi: 12.03.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### **Abstract**

In order to secure continuous and high quality supply of electricity, it is essential to protect end users' devices and network equipments against malfunction from production to consumption. Therefore, the protection of electrical equipment is essential and one of the devices performing the protection task is called the protection relay.

Industrial plants and large consumers that possess a high variation in loads and variable generation resulting from the widespread implementation of distributed generation requires the adaptive operation of relays in protection systems to prevent undesired malfunctions.

In this study, a novel fuzzy logic based adaptive relay coordination strategy with the advantages of reduced computational load and fast computing for distribution networks is proposed. In order to evaluate the performance of the developed relay coordination strategy, a real-world sample line for a ring-type distribution network has been simulated in PSCAD/EMTDC environment. The performance of the proposed system is validated with simulation results for different case studies.

**Keywords:** Relay coordination, Fuzzy logic, Ring networks

### **Kesinti Koşullarında Bulanık Mantık Tabanlı Röle Koordinasyon Senaryolarını Kullanarak Minimum Kesintili Elektrik Halka Şebekelerinin Beslenmesi**

### **Öz**

Üretimden tüketime kadar son kullanıcı cihazlarını ve şebeke ekipmanlarını arızalara karşı korumak, sürekli ve yüksek kalitede elektrik temini için esastır. Bu nedenle, elektrikli ekipmanların korunması önemli olup koruma görevini yerine getiren cihazlardan birisi de koruma rölesidir.

---

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Mehmet Uğraş CUMA, [mcuma@cu.edu.tr](mailto:mcuma@cu.edu.tr)

Endüstriyel tesislerin ve büyük tüketicilerin yüklerindeki aşırı değişkenlik ve dağıtık üretimin yaygın olarak uygulanmasından kaynaklanan değişken üretim, istenmeyen arızaları önlemek için koruma sistemlerindeki rölelerinin uyarlanabilir çalışmasını gerektirmektedir.

Bu çalışmada, daha düşük hesaplama yükü ve dağıtım şebekesi için hızlı hesaplama avantajları ile bulanık mantık tabanlı yeni bir uyarlanabilir röle koordinasyon stratejisi önerilmiştir. Geliştirilen röle koordinasyon stratejisinin performansını değerlendirmek için, PSCAD/EMTDC ortamında gerçek bir ring tipi dağıtım şebekesi simüle edilmiştir. Önerilen sistemin performansı, farklı durum çalışmaları için simülasyon sonuçları ile doğrulanmıştır.

**Keywords:** Röle koordinasyon, Bulanık mantık, Halka şebeke

## 1. INTRODUCTION

The relay performing the protection of the equipment against malfunction during the period from production to consumption is essential to ensure the continuous, reliable and high-quality transportation of electricity to the consumers [1].

The main tasks of the protection relays in the electricity distribution system are to detect the fault, the type of fault and generate a necessary trip signal. By performing these tasks, it is also intended to remove the defective area from the distribution system and to prevent the re-activation of the defective area. The aforementioned requirements reveal the importance of the coordination of the protection relay appropriate to the system structure. Properly configured relay coordination increases system reliability and reduces problems caused by faults or modifications [2].

The adaptive protection systems (re-coordinated protection relays) provide adjusting the parameters of protection relays according to the state of the defective area, the type of fault and modifications. Thus, the protection system can adapt to different operating conditions and minimize the possibility of faulty operation of the protection system. Thanks to the dynamic operation capability, adaptive protection systems offers more selective and reliable protection compared to conventional protection systems. Therefore, electricity distribution companies prefer adaptive protection systems instead of conventional protection systems [3-5].

In the relay coordination implemented by the electricity distribution company in Turkey, the

circuit breaker at the distribution center closest to the Transmission System Operator's (TSO) substation should be set to open in less than short-circuit current exposure time, which is determined as 1 second by the TSO. Because, any failure that can not be solved in the distribution network and floods on the gridline of TSO can cause damage to users who are fed from the related distribution line.

The faults and power flow modifications that occurred on distribution lines change the load distribution on both sides of the ring type network. Thus, the parameters of relay should be adjusted by considering the 1 second rule of TSO and, the overload protection relays must be provided with time curves automatically by measuring the load quantities in the lines.

Several studies have been performed to investigate the adaptive relay coordination in distribution systems. The importance of the implementation of adaptive protection (adaptive relay coordination) for a distribution system with penetration of distributed-generation (DG) is emphasized in Vijetha and Sarma, [6]. In Ateş et al. [7], a complicated selectivity-based adaptive relay coordination algorithm is developed and compared with conventional protection scheme for a distribution system equipped with wind power based DG. In Patil and Saunshi [8], a central decision software (SCADA etc.) is proposed in order to manage the network and adaptive relay coordination. Besides, traditional methods such as selection criterion of pickup currents Ezzeddine et al. [9] and curve intersection approach Lu and Chung [10] have been proposed in the literature. The relay coordination is defined as a constrained

non-linear optimization problem [11,12]. To solve the optimization problem, linear programming (LP) and nonlinear programming (NLP) methods are employed in [13-16]. Although the related methods can coordinate the parameters of relays, LP traps at local minimums while NLP has a high computational load. To eliminate the drawbacks of these methods, intelligent methods and evolutionary algorithms have been developed in the literature. A modified adaptive teaching learning based optimization algorithm is developed in [11]. Genetic algorithm [12,17], particle swarm optimization [18], seeker optimization algorithm [19], firefly algorithm [20] and differential evolution [21], methods have been proposed to coordinate relay parameters. As it is well known, the metaheuristic methods are iteration-based and take long time to converge.

In this study, fuzzy logic based adaptive relay coordination strategy is developed to reconfigure the relay parameters by considering the fault/modification occurring on a real-world sample line. A strategy based on the fuzzy logic method is used instead of iterative methods frequently used in the literature to reconfigure the relay parameters. Hence, the significant computational load resulting from the iterative methods is reduced. The performance of the proposed system is validated with simulation results.

The paper is organized in the following manner: The network configuration of the modeled ring type distribution system is described in Section 2. The fuzzy logic based parameter coordination is

presented in Section 3. Finally, Section 4 analyses the results and the contributions of this paper is presented in Section 5.

## 2. NETWORK CONFIGURATION

The main objective of the study is to reconfigure the relay parameters according to the fault/modification occurred on distribution network. The reconfiguration is performed using fuzzy logic method. In order to evaluate the fuzzy logic based adaptive relay coordination strategy, a simulation study that represents a real-world sample line in a ring-type distribution network has been conducted in EMTDC/PSCAD environment.

The single line diagram of the sample line which is illustrated in Figure 1 consists of two TSO connection, three distribution centers, eight circuit breakers, four line breakers (LBs) and loads. 50-62.5 kVA, 154/33.6 kV line transformers are employed to feed loads of ring type distribution network. LBs allow the network to provide uninterrupted power to consumers thanks to the functionality of ring type network during any event of failure. To evaluate the performance of the proposed strategy in point of reconfiguration of the relay parameters, a line-to-line (LL) fault which is one of the most frequently encountered fault types has been created in simulation studies.

The design parameters of the system are summarized in Table 1.

**Table 1.** Design parameters of the system

Parameter	Value
Transformer Power Ratings 1/2	50/62.5 kVA
Transformer Voltage Ratings 1/2	154/33.6 kV
System Frequency	50 Hz
Voltage Level of Network	154/31.5 kV
Line 1/2/3/4 Length	11/50/27/15 km
Distribution Centers	3 pcs
Number of Circuit Breakers	8 pcs
Line Breakers	3 pcs
Types of Conductors	Pigeon (3/0 AWG), Hawk (477 MCM)
Power Consumptions of Loads	26 MW + 2.4 MVAR

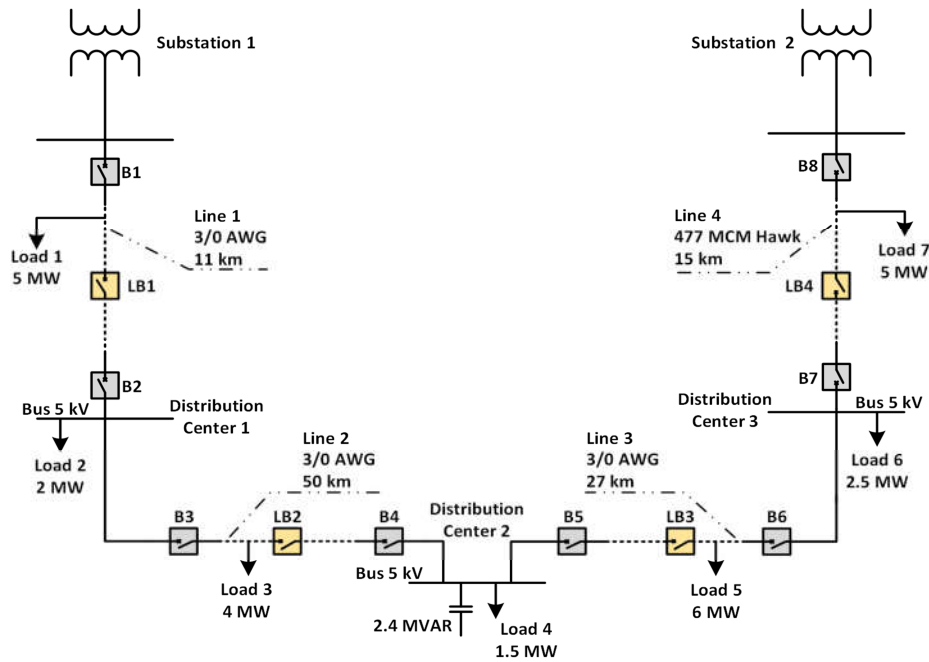


Figure 1. Single line diagram of the real-world sample line [22]

### 3. FUZZY LOGIC BASED ADAPTIVE RELAY COORDINATION

The relays are placed and parametrized by considering the location relative to the substation and 1 second rule of TSO. In the event of any fault or modification in the ring-type distribution line, the interrupted zones are bypassed by the LBs to provide uninterrupted power to consumers. Since the process of bypassing the consumers causes a change in the locations of the relays relative to the substation, coordination of the relay parameters is needed. The relay operating time is calculated by using the Equation 1 [23].

$$t = \text{TMS} \times \frac{0.14}{\left[ \left( \frac{I_f}{I_s} \right)^{0.02} - 1 \right]} \quad (1)$$

where  $t$  is the operating time of relay, Time Multiplier Setting (TMS) is the operating curve of the relay settings,  $I_s$  is the relay pickup current which is determined considering the primary rating

of the related current transformer and  $I_f$  is the fault current.

The architecture of fuzzy logic based coordinator is shown in Figure 2. The method has three steps; Fuzzification: it is aimed to convert the values defined in real-world operation (non-fuzzy) into fuzzy set variables (linguistic term)  $A_i^j$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) and  $B_j^j$  ( $j$  denotes the number of rules), which are characterized by membership functions  $\mu_{A_i^j}(x_i)$  and  $\mu_{B_j^j}(y_j)$  (Figure 3), using the knowledge acquired from operator experiences; Decision Making: it is aimed to combine membership functions with the IF-THEN rules, which is summarized in Table 2, to derive the fuzzy output; Defuzzification: it is aimed to convert fuzzy values obtained by the result of the rules into exact values by using the method of Center of Gravity (Equation 2).

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(w_i) w_i}{\sum_{i=1}^n \mu(w_i)} \quad (2)$$



The two-stage fuzzy logic structure is modeled as 4 inputs 2 outputs. The inputs and output of the first fuzzy logic structure are denoted as time,  $I_f/I_p$  and operating curve (opc) respectively. The inputs and output of the second fuzzy logic structure are denoted as operating curve (which is the output of

the other fuzzy logic structure),  $I_f/I_p$  and operation time parameter of relay. For ease of computation, the variables of the coordinator are described as; time  $T$ , fault current:  $I_f$ , operating curve:  $opc$ , fault current/load current:  $I_f/I_p$ , operation time parameter of relay:  $T_{relay}$ .

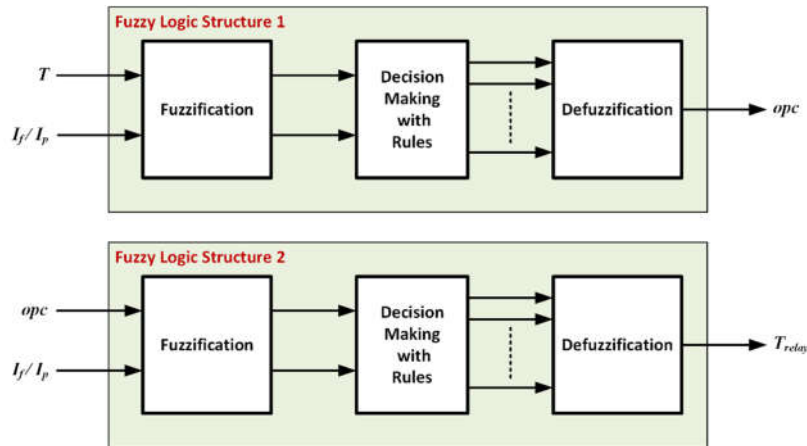


Figure 2. Fuzzy logic based coordinator architecture

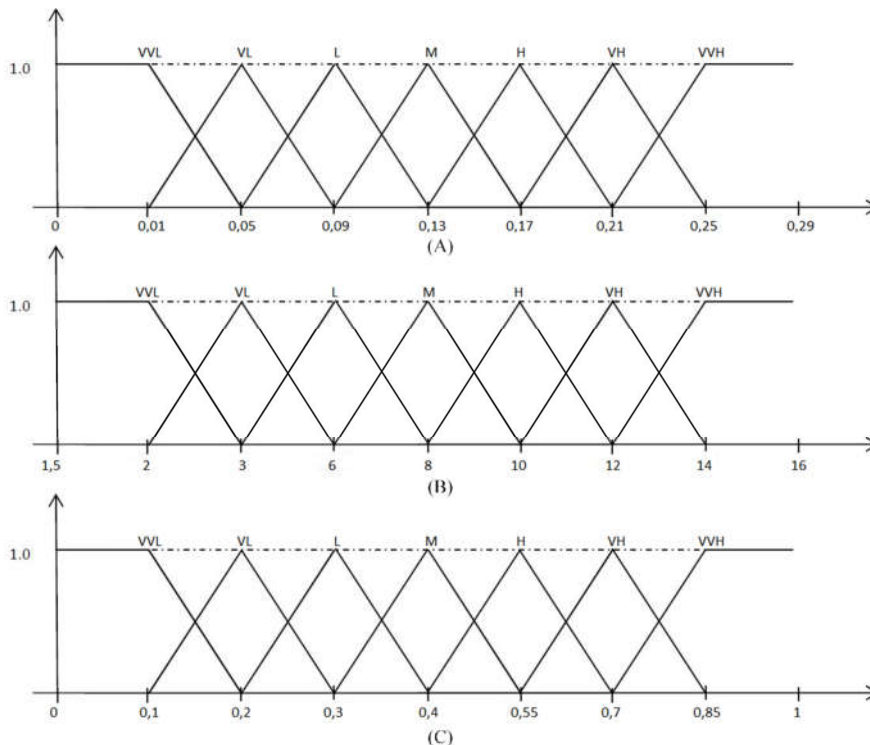


Figure 3. Membership functions of inputs of  $opc$  (A),  $I_f/I_p$  (B) and time (C)

**Table 2.** Fuzzy rules of the system

IF ( $Input_1$ is VVL) and ( $Input_2$ is VVL)	THEN $Output_1$
IF ( $Input_1$ is VVL) and ( $Input_2$ is VVL)	THEN $Output_2$
IF ( $Input_1$ is VVL) and ( $Input_2$ is VVL)	THEN $Output_3$
...	...
...	...
IF ( $Input_1$ is VVL) and ( $Input_2$ is VVL)	THEN $Output_{49}$

#### 4. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

In order to evaluate the performance of the proposed fuzzy logic based adaptive relay coordination for distribution networks, a real-world simulation model is developed for three phase 31.5 kV and 30 MVA ratings. The performance of the proposed strategy is verified with different case studies using simulation model. The details of the case studies are summarized in Table 3.

Line breakers used in the ring type systems ensure to provide alternative power transfer path for loads in an event of failure or modification of a distribution network. At least one of the three LBs on the line must be opened to prevent the phase conflict. Therefore, the LB2 and LB3 are used to separate the alternative supplies of ring type distribution network for case studies of 1 and 2 respectively.

Case 1: Consumers fed from SB1 (Substation 1) and SB2 are separated by LB2. The circuit

breakers closest to the SB1 and SB2 should be set to open in less than short-circuit current exposure time, which is determined as 1 second by the TSO. In the event of the failure, the current is monitored by the relays and issued trip commands to the circuit breaker when the determined withstand times of the relays are exceeded. Relay closest to the fault location is operated first. In case the closest relay fails to operate, the next relay in sequence operates. Therefore, the sequences of relays are determined as B1-B2-B3 for SB1 line and as B8-B7-B6-B5-B4 for SB2 line.

The tripping times of relays are calculated using fuzzy logic based strategy by considering the constraint of TSO and the related power flow condition. Figure 4 represents the comparison of the operating times of relays determined by manually and calculated by the proposed strategy. As can be seen from the figure, the proposed system determines the required tripping times accurately considering the sequences of relays. The performance of the proposed system is examined for a LL fault at the both sides of LB2 on Line 2 through a fault impedance of 3 ohm.

**Table 3.** The details of case studies

	Case 1	Case 2
<b>Line Breaker</b>	LB2	LB3
<b>Fault Location</b>	Line 2	Line 3
<b>Fault Type</b>	A-B fault (LL-F)	A-B fault (LL-F)
<b>Short Circuit Impedance</b>	3 ohm	3 ohm

Figure 5 presents the operating performance of the proposed strategy. The left axis of the Figure shows the breaker currents including the steady-state and fault conditions, while the right axis

shows the calculated breaker tripping times. As illustrated in Figure 5, three-phase balanced LL faults occur at 0.85s in SB1 and 0.91s in SB2. The breakers are exposed to short circuit current

throughout the tripping times of the breakers B3 and B4 (0.1983s and 0.1009s respectively) closest to the fault location. The relays send tripping

commands to the related circuit breakers and reliable operation is achieved isolating the defective area from the distribution network.

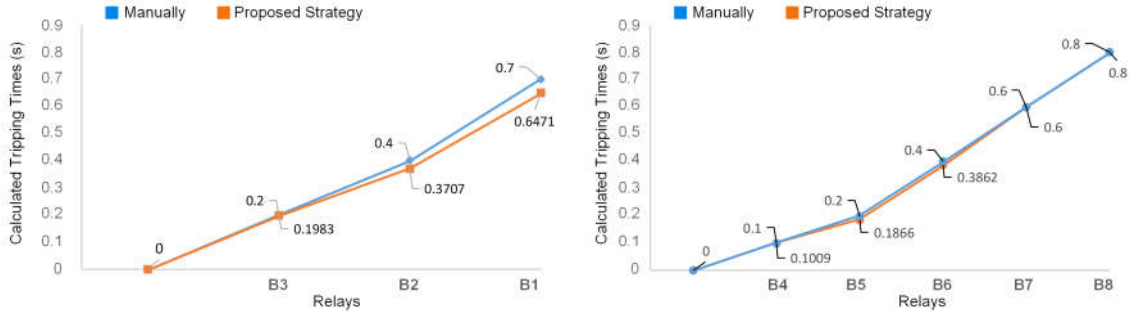


Figure 4. Comparison of the relay parameters for case 1

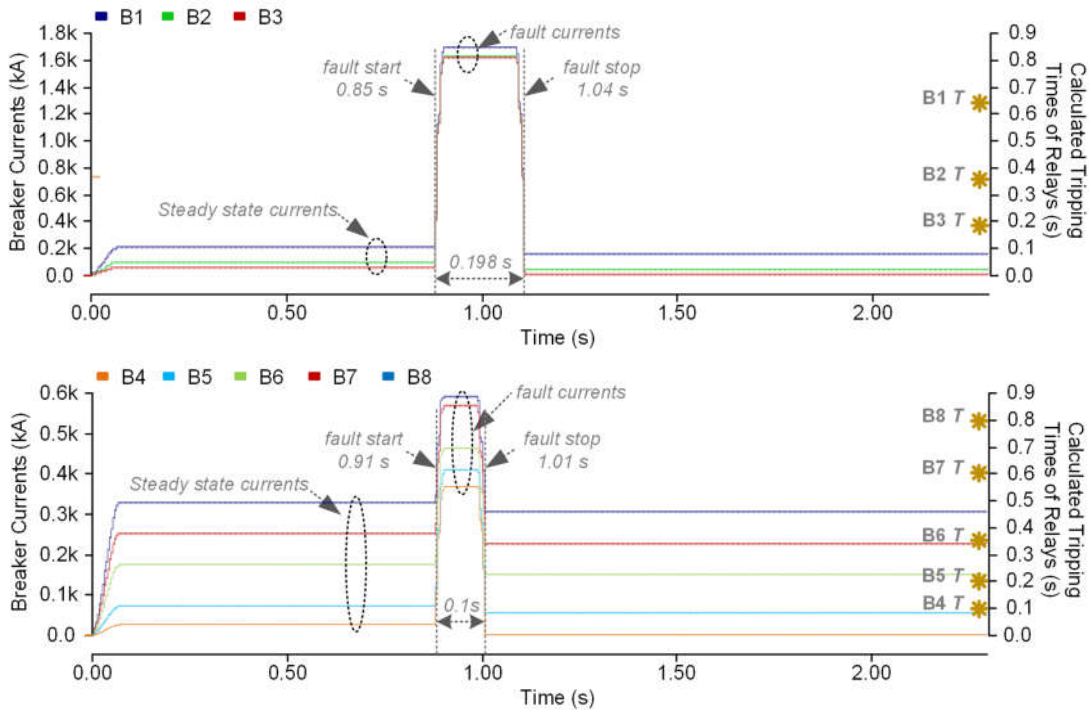


Figure 5. Test results for case 1

Case 2: In this case, the modification, that LB3 is opened to separate the alternative supplies of ring type distribution network while LB2 is closed, is investigated. When the system is operated without relay coordination, the tripping times and the sequences of relays will remain constant. Figure 6 represents the tripping times of relays of the

modified system that is operated without relay coordination. As illustrated in Figure 6, in the event of a fault in line between B5 and LB3, B4 which is located in the SB1 line operates first due to the unconfigured relay parameters. Therefore, users of the distribution network between B4 and B5 are unnecessarily affected by the fault.

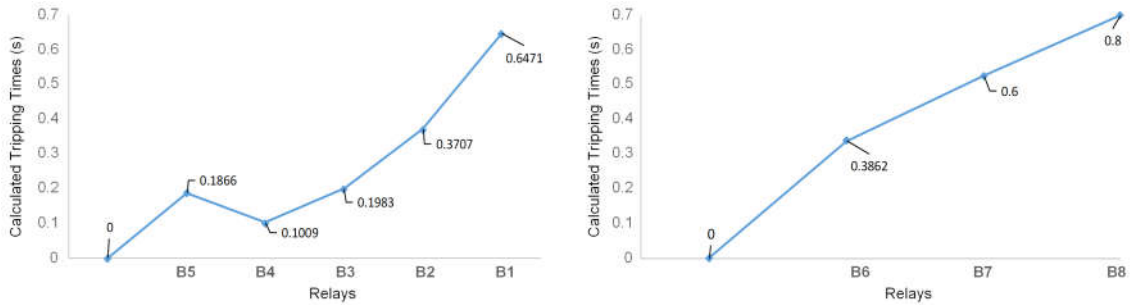


Figure 6. Relay parameters before reconfiguration

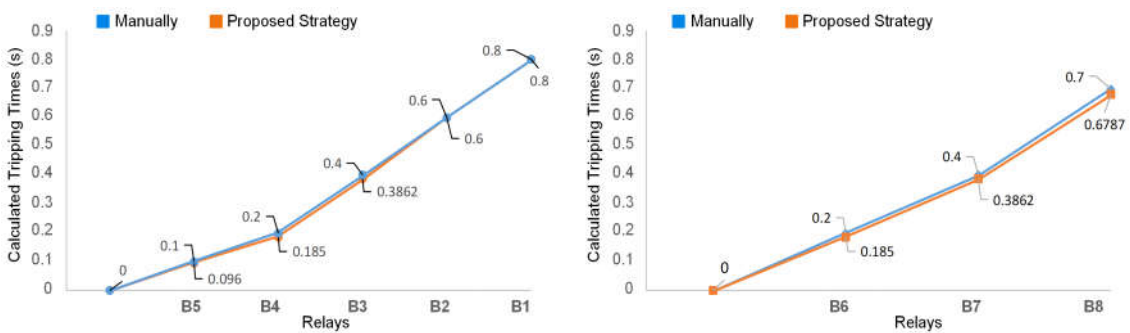


Figure 7. Comparison of the relay parameters for case 2

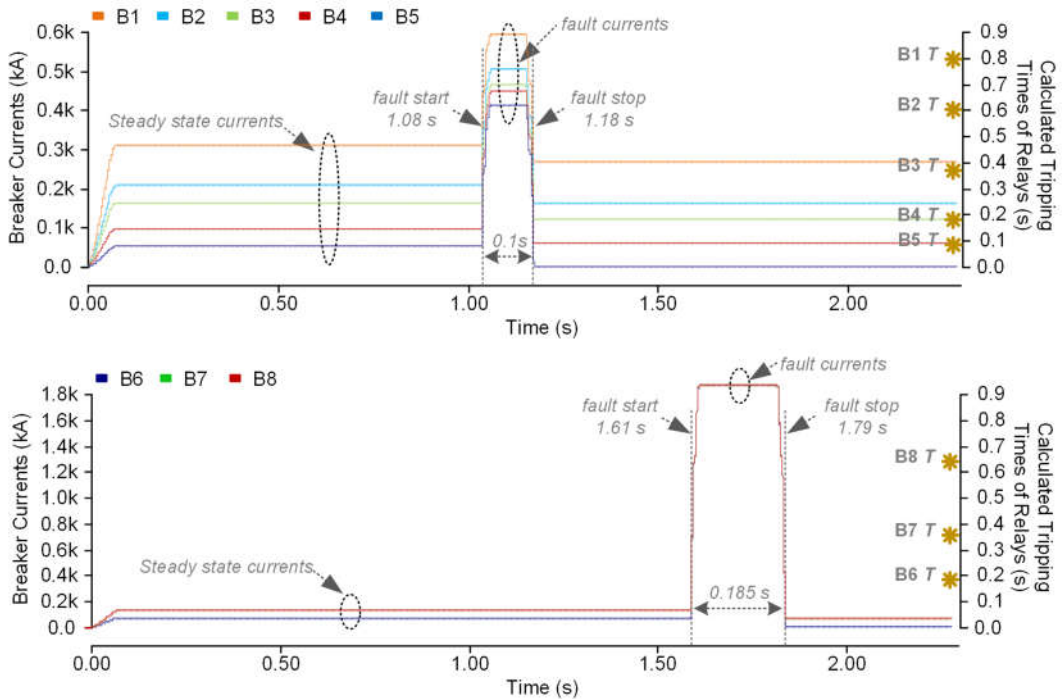


Figure 8. Test results for case 2

By considering the modification of power flow in the network, the sequences of relays are reorganized as B1-B2-B3 for SB1 line and as B8-B7-B6-B5-B4 for SB2 line by the proposed strategy. The relay parameters determined by manually and calculated by the proposed strategy is illustrated in Figure 7. The performance of the proposed system is examined for a LL fault at the both sides of LB3 on Line 3 through a fault impedance of 3 ohm.

Figure 8 shows the operating performance of the proposed strategy. As illustrated in Figure 8, three-phase balanced LL faults occurs at 1.08s in SB1 and 1.61s in SB2. The breakers are exposed to short circuit current throughout the tripping times of the breakers B5 and B6 (0.096s and 0.185s respectively) closest to the fault location. The relays send tripping command to the related circuit breakers and reliable operation is achieved isolating the defective area from the distribution network.

## 5. CONCLUSION

This study proposed a novel fuzzy logic based adaptive relay coordination strategy for distribution networks. The traditional strategies are constructed to solve the relay coordination problem with iterative methods. The advantages of the developed strategy are; reduced computation load, fast computing and adaptive operation.

The performance and reliability of the proposed strategy have been verified by the simulation of a real-world ring-type distribution network modeled in EMTDC/PSCAD environment. The results show that the proposed strategy can compute the relay parameters as close as possible to the manually determined values. Furthermore, the strategy able to be adapt the relay parameters to the power flow modification of the distribution system.

## 6. REFERENCES

1. Doğancı, A.Ç., 2014. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Adaptif Koruma. İstanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, Master Thesis.
2. Yumurtacı, R., 1995. Elektrik Güç Sistemlerinde Hatların Mesafe Röleleri ile Korunması. Yıldız Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, Master Thesis.
3. Choden, R., Sither, T., Namgyel, T., 2017. Overcurrent Relay Coordination In Distribution System, Royal University of Bhutan College of Science and Technology, Phuentsholing, Bhutan, Project Report, 1-78.
4. Sung, B.C., Lee, S.H., Park, J.W., Meliopoulos, A.P.S., 2013. Adaptive Protection Algorithm for Overcurrent Relay in Distribution System with DG, J Electr Eng Technol, 8(5), 1002-1011.
5. Coffele, F., Booth, C., Dyško, A., 2014. An Adaptive Overcurrent Protection Scheme for Distribution Networks. IEEE Transactions on Power Delivery, 30(2), 561-568.
6. Vijetha, K., Sarma, D.V.S.S.S., 2012. Adaptive Relaying of Radial Distribution System with Distributed Generation, National Power Systems Conference, 1-6.
7. Ates, Y., Boynuegri, A.R., Uzunoglu, M., Nadar, A., Yumurtacı, R., Erdinç, O., Paterakis, N.G., Catalão, J.P.S., 2016. Adaptive Protection Scheme for a Distribution System Considering Grid-Connected and Islanded Modes of Operation, Energies MDPI, 9(378), 2-18.
8. Patil, V.Y., Saunshi, G.B., 2014. An Overview on Adaptive Protection in Power System. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4(4), 396-400.
9. Ezzeddine, M., Kaczmarek, R., Iftikhar, M.U., 2011. Coordination of Directional Overcurrent Relays Using a Novel Method to Select Their Settings. IET Generation, Transmission & Distribution, 5(7), 743-750.
10. Lu, Y., Chung, J.L., 2013. Detecting and Solving the Coordination Curve Intersection Problem of Overcurrent Relays in Subtransmission Systems with a New Method. Electric Power Systems Research, 95, 19-27.
11. Kalage, A.A., Ghawghawe, N.D., 2016. Optimum Coordination of Directional

- Overcurrent Relays Using Modified Adaptive Teaching Learning Based Optimization Algorithm, *Intelligent Industrial Systems*, 2, 55-71.
12. Esmaili, P., 2014. Overcurrent Relay Setting By Using Adaptive Technique, Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, Master Thesis.
  13. Bedekar, P.P., Bhide, S.R., Kale, V.S., 2009. Coordination of Overcurrent Relays in Distribution System Using Linear Programming Technique. *International Conference on "Control, Automation, Communication and Energy Conservation*, 1-4.
  14. Gupta, A., Swathika, O.V.G., Hemamalini, S., 2015. Optimum Coordination of Overcurrent Relays in Distribution Systems using Big-M and Dual Simplex Methods. *International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, 1540-1543.
  15. Srinivas, S.T.P., Verma, P.P., Swarup, K.S., 2019. A Novel Convexified Linear Program for Coordination of Directional Overcurrent Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(2), 769-772.
  16. Srinivas, S.T.P., Swarup, K.S., 2019. A New Mixed Integer Linear Programming Formulation for Protection Relay Coordination Using Disjunctive Inequalities. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 6(2), 104 -112.
  17. Rezaei, N., Uddin, M.N., Amin, I.K., Othman, M.L., Marsadek, M., 2019. Genetic Algorithm-Based Optimization of Overcurrent Relay Coordination for Improved Protection of DFIG Operated Wind Farms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 5727-5736.
  18. Mansour, M.M., Mekhamer, S.F., El-Kharbawe, N.S., 2007. A Modified Particle Swarm Optimizer for the Coordination of Directional Overcurrent Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1400-1410.
  19. Amraee, T., 2012. Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Seeker Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3), 1415-1422.
  20. Khurshaid, T., Wadood, A., Farkoush, S.G., Kim, C.H., Yu, J., Rhee, S.B., 2019. Improved Firefly Algorithm for the Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays. *IEEE Access*, 7, 78503–78514.
  21. Alam, M.N., Das, B., Pant, V., 2015, A Comparative Study of Metaheuristic Optimization Approaches for Directional Overcurrent Relays Coordination. *Electric Power Systems Research*, 128, 39-52.
  22. ENERJISA Toroslar Adana, 2020.
  23. Measuring Relays and Protection Equipment-Part 151: Functional Requirements for Over/Under Current Protection, IEC Standard 60255-151, 2009.

## Elektrodepolanmış Nanokompozit Kaplamalarda Elektrolit Bileşenlerinin Etkisi

Ersin ÜNAL<sup>1</sup>, Abdulkadir YAŞAR<sup>\*2</sup>, İsmail Hakkı KARAHAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>3</sup>Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Hatay

Geliş tarihi: 04.02.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Bu çalışmada, nikel esaslı alaşım ve nanokompozit kaplamalar elektrokimyasal depolama metodu ile paslanmaz çelik altlık üzerine üretilmiştir. Watts tipi nikel banyosuna bor kaynağı olarak trimetilamin boran (TMAB) ilave edilerek Ni-B alaşım kaplama elde edilmiş, daha sonra buna ilave olarak banyoya titanyum diborür (TiB<sub>2</sub>) seramik nano parçacıkları ilave edilerek nanokompozit kaplama elde edilmiştir. Elektrolit bileşenlerinin kaplama özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla elektrokimyasal, mikrosertlik, korozyon dayanımı ve yüzey morfolojileri açısından analizler yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda her banyo bileşeninin morfoloji, sertlik ve korozyon dayanımı gibi özellikleri ciddi miktarda etkilediği görülmektedir. Genel olarak yüzey morfolojiler pürüzsüz olmakla birlikte, nanokompozit kaplamanın yüzeyinin daha kaba olduğu optik resimlerden anlaşılmaktadır. Ana yapıya bor elementi ilavesi mikro sertliği yaklaşık %38 oranında artırırken, TiB<sub>2</sub> takviyesiyle birlikte saf nikel göre %140, Ni-B alaşımına göre %75 oranında iyileşme olmasına sebep olmuştur. Bor takviyesi korozyon dayanımını azaltırken, TiB<sub>2</sub> takviyesi korozyon dayanımında artışa neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:**Elektrodepolama, Nanokompozit kaplamalar, Ni-B alaşım, Elektrokimyasal kaplama

### Effect of Electrolyte Components on Electrodeposited Nanocomposite Coatings

#### Abstract

In this study, nickel-based alloy and nanocomposite coatings were produced on a stainless steel base with the electrochemical deposition method. Ni-B alloy coating was obtained by adding trimethylamine borane (TMAB) as a boron source to the Watts type nickel bath, and in addition, titanium diboride (TiB<sub>2</sub>) ceramic nanoparticles were added to the bath in order to obtain a nanocomposite coating. In order to examine the effects of electrolyte components on coating properties, analyzes were carried out in terms of electrochemical, microhardness, corrosion resistance and surface morphology. As a result of the examinations, it was seen that each bath component has a serious effect on the coating properties such as morphology, hardness and corrosion resistance. In general, although surface morphologies were smooth, it was understood from the optical images that the surface of the nanocomposite coating was more coarser. While the addition of boron element to the main structure increased the microhardness by about 38%, with the TiB<sub>2</sub> supplement, it caused 140% improvement over pure nickel and 75% improvement over Ni-B alloy. While boron reinforcement reduced corrosion resistance, TiB<sub>2</sub> reinforcement caused an increase in corrosion resistance.

**Keywords:** Electrodeposition, Nanocomposite coatings, Ni-B alloys, Electrochemical coatings

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: Abdulkadir YAŞAR, [ayasar@cu.edu.tr](mailto:ayasar@cu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Mühendislik ve endüstriyel alanlarda kullanılan malzemeler zorlu hizmet koşulları ile karşı karşıya kalmakta ve bu koşullar altında aşınma ve korozyona dayanıklı olmaları beklenmektedir. Korozyon ve aşınma nedenli ortaya çıkan kesinti ve fabrika duruşları sebebiyle her yıl milyarlarca liralık maliyet ortaya çıkmaktadır [1]. Bir malzemenin, genellikle korozyon, aşınma ve kırık şeklindeki hasarı, yüzeyinden başlar ve bu da performansını ve hizmet ömrünü azaltabilir [2-4]. Bunun başlıca nedeni, yüzeyin genellikle ilk olarak zararlı etkilere maruz kalmasıdır. Malzemelerin tümünün özelliklerinin iyileştirilmesiyle karşılaştırıldığında, yüzey teknolojisi (kaplama ve modifikasyon) etkili ve düşük maliyetli bir yöntemdir. Bu nedenle, yüzey modifikasyonu veya yüzey kaplama teknolojisi, özellikle korozyon ve aşınma sürecini önlemek ve mühendislik parçalarının bozulma sürecini geciktirmek için üretim sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5,6]. Malzemelerin yüzey dayanımı özellikleri nitritleme, karbonitritleme, indüksiyonla sertleştirme, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme, karbürleme, lazerle sertleştirme, alevle sertleştirme, iç oksidasyon, elektriksiz veya elektrokimyasal depolama gibi birçok teknikle iyileştirilebilir [6]. Elektrikli ve elektriksiz depolama teknikleri kendi içinde karşılaştırıldıklarında, yüksek sıcaklık ve yüksek pH gereksinimlerinden dolayı elektriksiz depolama tekniği dezavantajlı duruma düşmektedir. Buna karşın elektrikli depolama işlemi hem düşük sıcaklık hem de düşük pH değerlerinde gerçekleştirilebilmektedir. Elektrokimyasal depolama elektrik akımı iletebilen bir altlık üzerine yine elektrik akımı iletebilen metal ya da alaşımların yoğun ve altlığa sıkı tutunmuş bir şekilde kaplanabildiği ekonomik ve etkili bir yüzey modifikasyon tekniğidir. Fakat teknolojinin ilerlemesi ile birlikte metal veya alaşımların performansı bazı uygulamalarda yeterli olamamaktadır. Metal veya alaşımların dayanımını daha üst seviyelere ulaştırmak için seramik parçacıklarla takviye edilmesi gerekmektedir ve elektrodepolama tekniği kompozit kaplamaların üretilebilmesi için çok uygun bir tekniktir [7].

Elektrokimyasal olarak biriktirilen metal ya da alaşım tabakaların içine çözünmeyen ikinci faz parçacıkların eşdepolanması ile elde edilen kompozit kaplamaların üretilmesinde kullanılan bu yöntem yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [8]. Bu teknikte karbürler, nitritler, oksitler ve borürler gibi birçok seramik takviye parçacık çeşidi başarıyla eşdepolanabilmektedir [9]. Metal ve alaşım kaplamaların ikinci faz parçacıklarla takviyesiyle sadece sürtünme, aşınma, sertlik ve aşınma direnci gibi özellikler değil aynı zamanda korozyon direnci ve kimyasal özelliklerinde de gelişme sağlanmaktadır [10].

Son yıllarda elektrodepolanmış nanokompozit kaplamalarla ilgili araştırmalarda anayapı malzemesi olarak sıklıkla tercih edilen nikel-bor alaşım kaplamalar yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci (sert krom kaplamalardan daha iyi) ve iyi anti korozyon özelliklerine sahiptir. Ni-B kaplamalar otomotiv, uzay, nükleer, petrokimya, bilgisayar, elektronik, plastik, optik, tekstil, kâğıt, gıda ve matbaa endüstrilerinde kullanılmaktadır [11,12]. Ni-B alaşımının elektrodepolama metoduyla takviye edildiği yayınlardan bazılarına hBN [1, 13-16], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [2,5], YSZ [3], CeO<sub>2</sub> [6], TiC [17], WC [18], SiC [19-21], Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [22], elmas [23,24], Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [25], Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [26], AlN [27], Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [28] örnek olarak verilebilir.

Titanyum diborür (TiB<sub>2</sub>) yüksek sertlik (3350 Hv), yüksek erime noktası (2980 °C), düşük elektrik direnci (9 Ω cm), yüksek ıslanabilirlik, iyi korozyon direnci, iyi ısıl şok direnci ve kimyasal olarak asal olma gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, TiB<sub>2</sub> mükemmel mekanik ve aşınma direnci özellikleriyle de bilinmektedir. Bu özellikleri nedeniyle türbin kanatları, yanma odaları, kimyasal reaktör kapları, elektrotlar, potalar, pompa çarkları ve kesici takımlar gibi birçok yüzey mühendisliği uygulamalarında uygun bir kaplama malzemesidir [29-31]. Gyawali ve arkadaşları [31], Ni-W/TiB<sub>2</sub> kompozit kaplamasını elektrodepolama tekniği ile üretmişler, mekanik, sürtünme, aşınma ve yağlanma özelliklerini incelemişlerdir. Yazarlar bu kompozit kaplamanın hem kuru hem de yağlı şartlar altında, saf nikel ve Ni-W alaşım kaplamaya göre daha gelişmiş sürtünme ve aşınma özellikleri sergilediğini



raporlamışlardır. Yazarlar ayrıca kompozit kaplamanın mikro sertliğinin ve çizilme mukavemetinin de saf nikel ve Ni-W alaşım kaplamaya göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Xiaozhen ve arkadaşları [32],  $TiB_2$  ve  $Sm_2O_3$  parçacıklarının karışımıyla takviye ettikleri Ni alaşımlı kompozit kaplamayı çelik altlık üzerine elektro kimyasal olarak depolamışlardır. Yazarlar karşılaştırmayı saf nikel, Ni- $TiB_2$ , Ni- $Sm_2O_3$  elektrokimyasal kaplamalarla yapmışlar ve Ni- $TiB_2$ - $Sm_2O_3$  kompozit kaplamanın mikro sertliğinin diğer kaplamalardan daha yüksek olduğunu, ayrıca aşınma ağırlık kaybının ise daha düşük olduğunu raporlamışlardır. Yazarlar sürtünme katsayısında ise en düşük değerini Ni- $Sm_2O_3$  kompozit kaplamasına ait olduğunu belirtmişlerdir. Xiaozhen ve arkadaşları [33],  $TiB_2$  ve  $Dy_2O_3$  parçacıklarının karışımından oluşan takviye fazı ile destekledikleri nikel matrisini elektrodopolama metodu ile çelik altlık üzerine kaplamışlar ve ürettikleri kompozit malzemenin sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Yazarlar karşılaştırma amacıyla saf nikel ve Ni- $TiB_2$  kaplamalarını kullanmışlardır. Yazarların elde ettikleri sonuçlara göre en düşük sürtünme katsayısı ve aşınma ağırlık kaybı ve en yüksek mikro sertlik değerleri Ni- $TiB_2$ - $Dy_2O_3$  kompozit kaplamasında elde edilmiştir. Gyawali ve arkadaşları [30], saf nikel metalini  $TiB_2$  parçacıkları ile takviye ederek darbeli elektrokaplama tekniği ile paslanmaz çelik üzerine depolamışlardır. Farklı  $TiB_2$  banyo parçacık konsantrasyonlarında numuneler üretmişler ve mikrosertlik, korozyon dayanımı gibi özellikleri incelemişlerdir.  $TiB_2$  takviyesiyle kompozit kaplamanın mikrosertlik değeri saf nikel kaplamaya göre 3 kat daha fazla artış göstermiştir. Ayrıca  $TiB_2$  takviyesinin saf nikel korozyon dayanımında iyileşme sağladığını raporlamışlardır.

Bu çalışmada nikel metalinin depolandığı Watts tipi elektrolite önce bor elementi kaynağı olan TMAB eklenmiş, daha sonra  $TiB_2$  ikinci faz seramik parçacıkları ilave edilmiş ve böylece nikel ana yapısı önce bor elementi ile daha sonra  $TiB_2$  parçacıkları ile takviye edilmiştir. Mükemmel mekanik özellikleri ile bilinen Ni-B ve  $TiB_2$  ikilisini ilk kez bir arada kullanarak hem literatüre

hem de sanayiye önemli bir alternatif sunulması amaçlanmaktadır. Bu takviyelerin hem Ni-B alaşım kaplamayı hem de Ni-B/ $TiB_2$  nanokompozit kaplamayı nasıl etkilediği elektrokimyasal, morfolojik, mikrosertlik ve korozyon dayanımı gibi analiz metotları ile incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Saf nikel, titanyum diborür ( $TiB_2$ ) takviyeli nanokompozit kaplamalar ve Ni-B alaşım kaplamalar paslanmaz çelik altlık üzerine, Watts tipi nikel banyosunda elektro-kimyasal kaplama metodu ile depolanmıştır. Bütün elektrokimyasal deneyler CH Instruments 608E model elektrokimyasal analiz cihazıyla gerçekleştirilmiş ve geleneksel üç elektrotlu sistem kullanılmıştır. Anot olarak platin tel, katot olarak ise  $4\text{ cm}^2$  alana sahip paslanmaz çelik plaka kullanılmıştır. Referans elektrot olarak ise doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Anot ve katot kaplama banyosu içinde dikey ve birbirine paralel olarak yerleştirilmiştir ve aralarında yaklaşık 3 cm mesafe bırakılmıştır. Paslanmaz çelik altlık depolama işlemine tabi tutulmadan önce kalından inceye doğru zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve daha sonra %10 oranında hidroklorik (HCl) asitle karıştırılmış saf su içinde dağlanmış ve daha sonra saf su ile durularak oda sıcaklığında kurutulmuştur. Bütün kimyasal maddeler Sigma-Aldrich firmasının ürünleridir ve saflık dereceleri Çizelge 1'de ilgili kimyasalın yanında verilmiştir. Dönüşümlü voltametri (CV) deneyleri için kullanılan altlık, bu deneyden sonra tekrar aynı işlemden geçirilerek kullanılmıştır. Banyo bileşenleri ve depolama şartları Çizelge 1'de verilmiştir. Sheu ve arkadaşları [34] Ni-B ile ilgili çalışmalarında elektrokimyasal depolamada bor kaynağı olarak kullanılabilen dimetilamin boran'ın (DMAB), trimetilamin boran kompleksi'ne (TMAB) göre daha yüksek sıcaklıklarda ( $>75\text{ }^\circ\text{C}$ ) çözündüğünü ve TMAB'lı kaplama banyosunun diğerine göre daha stabil olduğunu belirtmişlerdir. Bu açıklamalar ışığında bor kaynağı olarak (TMAB) tercih edilmiştir. Sodyum dodesil sülfat (SDS) ve sakarin gibi katkıları kompozit kaplama üretilirken titanyum diborür parçacıklarının elektrolit içinde süspanse edilebilmesi ve

topaklanmaları önlemek için kullanılmıştır. Ayrıca nanokompozit kaplama banyosu depolama öncesinde Hielscher UP 200S marka ve model ultrasonik karıştırma cihazı ile 30 dk boyunca karıştırılmıştır. Bu işlem yapılırken çevrim değeri 1 olarak, genlik değeri ise %70 olarak ayarlanmıştır (~20 kHz). Banyoya nano boyutta takviye seramik parçacıklar eklenmesi ile birlikte ortaya çıkan topaklanmaların önlenmesi için mutlaka ultrasonik karıştırma işleminin uygulanması gerekmektedir. Ünal ve Karahan [14], depolama öncesi ultrasonik karıştırmanın etkisini araştırmışlar ve bu işlemin hem parçacık topaklanmasını önleme açısından hem de parçacıkların homojen dağılımı açısından çok etkili olduğunu raporlamışlardır. Titanyum diborür parçacıklarının ortalama toz boyutu 500 nm'dir (satın alınan firmanın bildirdiği toz boyutu). TiB<sub>2</sub> nano parçacıklar Nanografi firmasından satın alınmıştır ve %99 saflıktadır. Kaplama depolama süresi 60 dk olarak ayarlanmıştır ve depolama boyunca sıcaklık 43±1°C'de tutulmuştur. Ayrıca depolama esnasında banyo manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Banyonun pH değeri HCl asit ve sodyum hidroksit (NaOH) kullanılarak 4 değerine ayarlanmıştır. Bütün depolama işlemlerinde akım yoğunluğu değeri sabit tutulmuş ve 50 mA/cm<sup>2</sup>

olarak uygulanmıştır. Depolama sonrası kaplamalar saf su ile durulanmış ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Future-TECH FM-700e marka ve model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik değerleri ölçülürken 500 g yük numune üzerine 10 s boyunca uygulanmıştır. Her bir numunede en az 10 farklı bölgeden ölçümler alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması mikro sertlik değeri olarak kabul edilmiştir. Yapılan mikro sertlik ölçümleri neticesinde ortalamadan aşırı derecede sapan sertlik değerleri numunenin genel ortalamasına dahil edilmemiştir. Kaplamaların korozyon performanslarının değerlendirildiği açık devre potansiyeli (OCP) grafikleri kütlece %3,5 NaCl çözeltisinde 3600 s boyunca ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Nano TiB<sub>2</sub> parçacıkların toz boyutu ölçümü verileri Malvern Mastersizer 3000 marka ve model cihaz kullanılarak elde edilmiştir. Optik mikroskop çekimleri ise Olympus BX51 marka ve model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. CV deneylerinde tarama hızı 10 mV/s olarak ayarlanmıştır ve tarama -1,2 V ile 1,2 V arasındaki potansiyel değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu potansiyeller Watts tipi nikel banyosunun tipik özelliklerine göre seçilmiştir.

**Çizelge 1.** Elektrolit bileşenleri ve üretim parametreleri

Elektrolit bileşenleri ve saflık dereceleri/ Üretim Parametreleri	
NiSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O (Nikel sülfat hekza hidrat) %99,99	240 g/l
NiCl <sub>2</sub> . 6H <sub>2</sub> O (Nikel klorür hekza hidrat) %98	45 g/l
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (Borik asit) %99,5	30 g/l
Trimetilamin boran kompleks (TMAB) %97	3 g/l
Titanyum diborür tozu (TiB <sub>2</sub> ) %99	9 g/l
Sodyum dodesil sülfat (SDS) %99	0,5 g/l
Sakarin %98	2 g/l
Akım yoğunluğu	50 mA/cm <sup>2</sup>
pH	4
Sıcaklık	43±1 °C
Süre	60 dk
Banyo karıştırma hızı	200-300 rpm
Depolama öncesi ultrasonik karıştırma	30 dk

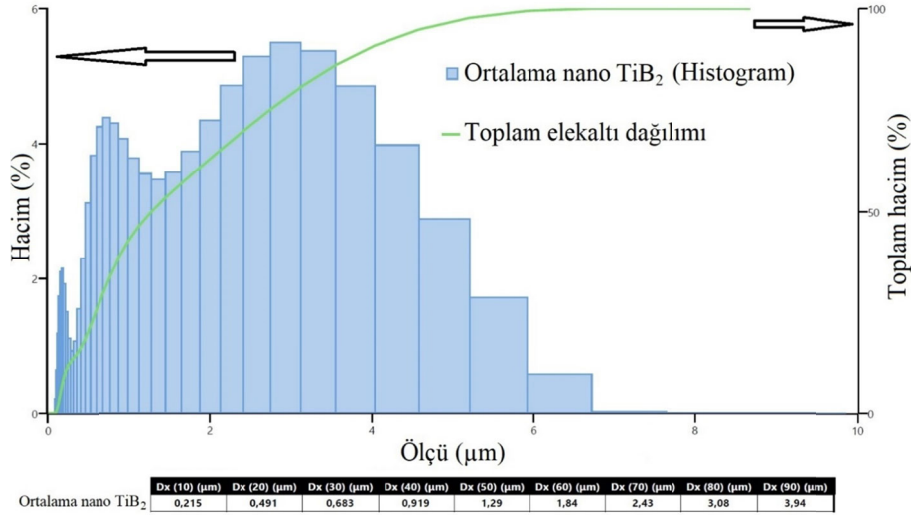
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Şekil 1'de nano TiB<sub>2</sub> tozlarının parçacık boyutu ölçüm cihazı ile elde edilen değerler verilmiştir.

Elde edilen değerlere göre, tozların %50 kadar miktarı 1 µm'un altında toz boyutuna sahiptir. Geriye kalan tozların boyutu ise 1 µm'dan büyük görünmektedir. Mikron boyutunda çıkan tozların

büyük bir çoğunluğunun topraklanma sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Elektrodepolama öncesi 30 dk banyonun ultrasonik olarak karıştırılması işlemi bu topraklanmaları gidermek

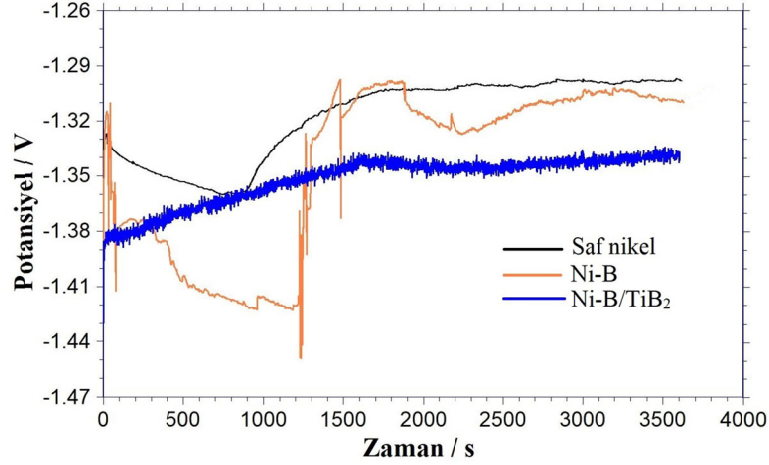
için yapılmaktadır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde en büyük parçacık boyutu 4  $\mu\text{m}$ 'dan küçüktür. En küçük parçacık boyutu ise yaklaşık 200 nm civarındadır.



Şekil 1. Nano TiB<sub>2</sub> parçacıkların toz boyutu dağılımı

Şekil 2’de saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların kronopotansiyometri grafikleri verilmiştir. Bu grafikler potansiyel değişiminin sabit akım uygulanması durumunda zamanın fonksiyonu olarak elde edildiği eğrilerdir [35]. Bu grafikler sayesinde belirlenen sabit bir akımda depolama esnasında potansiyelin hangi değerlerde gerçekleştiği ve değişen zamanla birlikte ne tür değişimler gerçekleştirdiği gözlemlenebilir. Stabil banyolarda bu eğriler daha yatay bir seyir izlemekte ve ani voltaj değişimleri görülmemektedir, fakat elektrolite eklenen her bileşenle birlikte ani voltaj azalma ve yükselmelerinin olduğu salınımlı bir eğri yapısı ortaya çıkabilmektedir. Şekil 2 incelendiğinde saf nikelin depolandığı Watts tipi nikel banyonun nispeten stabil olduğu söylenebilir. Banyoya bor kaynağı olarak kullanılan TMAB’ın eklenmesi depolanma potansiyellerinde ani salınımların ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bu salınımlar Ni-B alaşım kaplamasının dengesiz bir şekilde depolandığının bir göstergesi olabilir, zaten elde edilen Ni-B alaşım filmi de iç gerginlikten dolayı altlık yüzeyine tutunamamakta ve kıvrılarak altlıktan ayrılmaktadır. Nikel kafes yapısına bor

atomları katı çözeltili sertleşmesine sebep olacak şekilde yerleşmekte ve aşırı kırılğan ve gergin bir yapı ortaya çıkmaktadır [34]. Nanokompozit Ni-B-TiB<sub>2</sub> kaplamasının kronopotansiyometri grafiği incelendiğinde nispeten stabil bir seyir izlediği söylenebilir. Bu duruma nanokompozit kaplama banyosuna eklenen SDS ve sakarin gibi katkı maddelerinin olumlu bir etkisinin olduğu söylenebilir. Saf nikel ve nanokompozit kaplamaların paslanmaz çelik altlık malzemesine adhezyonu Ni-B alaşım kaplamaya göre çok daha iyi elde edilmiştir. Literatürde Ni-B alaşım kaplamaların mikro çatlaklı olduğu ve aşırı kırılğan olduğu raporlanmaktadır [36]. Bu konu ile alakalı bazı çalışmalarda, bu sorunun çözümü için bor içeriğinin düşük tutulması gerektiği, diğer bir alternatif ise bor kaynağının banyoya aralıklı bir şekilde ilave edilmesi gerektiği ifade edilmiştir [37,38]. Grafikten de görüldüğü üzere banyoya TMAB ve TiB<sub>2</sub> parçacıkları ilavesiyle birlikte sabit akım değerini sağlayabilmek için elektrolitin depolanma potansiyelinin bir miktar artış gösterdiği anlaşılmaktadır. Banyoya bileşenlerin eklenmesi ile birlikte depolanma voltajı -1,3 V’tan -1,36 V civarlarına yükselmiştir.



Şekil 2. Saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların kronopotansiyometri grafikleri

Şekil 3'te saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların optik mikroskop resimleri 1000x ve 500x büyütme değerinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Genel olarak kaplamaların yüzey morfolojilerinin pürüzsüz olduğu söylenebilir. Ama Ni-B alaşım kaplama diğerlerine göre düz bir görüntü sergilememektedir. Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplama ise diğerlerine göre en pürüzlü morfolojiye sahiptir. Bu duruma TiB<sub>2</sub> seramik parçacıklarının sebep olduğu söylenebilir. Guglielmi [39] çalışmasında elektrik akımıyla depolanabilen metal iyonlarıyla birlikte nano veya mikro boyuttaki seramik parçacıkların birlikte depolanması ve parçacıkların ana yapıya dahil olması olayını şu şekilde izah etmiştir. Önce iyonlar elektrolit içindeki seramik parçacıkların yüzeyine adsorblanmakta ve bu parçacıkların etrafında iyonik bir bulut oluşturmaktadırlar. İyonlarla çevrelenmiş ikinci faz parçacıklar (kollodial parçacıklar) bu sayede katoda doğru sürüklenmektedirler. Daha sonra katot yüzeyine önce zayıf bir şekilde adsorblanan parçacıklar diğer bir yandan elektrik yüklerini boşaltan metal iyonları arasında kalarak katot yüzeyinde büyüyen metal tabakaları arasında kapana kısılmakta ve böylece kademe kademe birlikte depolanma olayı gerçekleşmektedir.

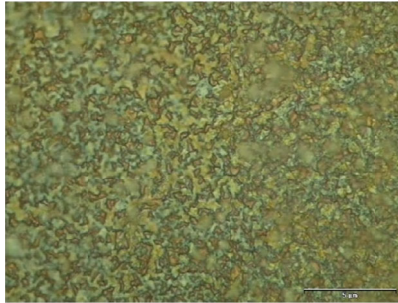
Şekil 4'de saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların dönüşümlü voltametri (CV) grafikleri her kaplama çeşidini temsil eden

eğrilere farklı renkler verilerek sunulmuştur. CV tekniğinde potansiyel zamanla doğrusal olarak değiştirilir. Zamanla potansiyelin birbirleri arasındaki değişim hızı tarama hızı olarak isimlendirilir [40]. Bu grafiklerden elektrolitin indirgenme ve yükseltgenme potansiyelleri akımın yükselmesi ile anlaşılabilir ve banyoya eklenen bileşenlerin bu değerleri nasıl etkilediği hakkında önemli bilgiler elde edilmektedir. Elektrokimyasal kaplamada akım ve potansiyel en önemli ve temel üretim parametrelerindedir. Şekil 4'den görüleceği üzere katodik yönde, yani 1,2 V'tan -1,2 V'a (sağdan sola doğru) grafik incelendiğinde 1,2 V ile 0,4 V arasında ortaya çıkan pikler gaz çıkışına işaret etmektedir. Yaklaşık olarak 0 V değerinden sonra akım değeri de sıfır amper (A) olarak ilerlemekte ve -0,7 V değeri civarlarına kadar düz bir eğri şeklinde devam etmektedir. Bu aralıkta elektrokimyasal banyoda herhangi bir reaksiyon olmadığı gözlenmektedir. 3 elektrokimyasal banyoda da -0,83 V civarlarına gelindiğinde ani akım artışıyla birlikte nikel metalinin depolanmaya başladığı anlaşılmaktadır. Yani banyoya bor kaynağı TMAB ve takviye parçacık TiB<sub>2</sub> eklenmesi depolanma başlangıç potansiyelini çok fazla etkilememiştir. Fakat TiB<sub>2</sub> parçacıklarının elektrolite eklenmesinin akım yoğunluğunda bir azalmaya sebep olduğu grafikten görülmektedir. Bu durumun takviye parçacıklarının elektrolit iletkenliğinde bir miktar azalmaya sebep olmasından dolayı olduğu öne sürülebilir. TiB<sub>2</sub> her ne kadar elektriksel olarak

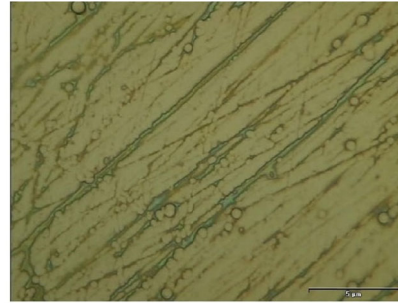
iletken bir seramik olmasına rağmen, saf nikel ve Ni-B alaşımlarının depolandığı  $TiB_2$  parçacıklarının ilave edilmediği banyolara kıyasla elektrolitin elektrik iletkenliğinde azalma olması muhtemeldir. TMAB ilavesi ise akım yoğunluğu üzerinde önemsenmeyecek derecede çok küçük bir artış etkisi göstermiştir. Anodik yön, yani eksi potansiyelden artı potansiyele doğru tarama yapıldığında depolanan metal geri elektrolit içine çözünmekte ve bu esnada pik şeklinde tepe veya tepeler ortaya çıkmaktadır. Şekilde verilen grafik incelendiğinde saf nikelde ait CV eğrisinde -0,1 V ve 0,05 V civarlarında 2 adet çözünme piki olduğu görülmektedir. Elektrolite TMAB ilavesi çözünme pikinin yüksekliğinin artmasına pozitif tarafa kaymasına sebep olmuştur. Ni-B alaşım üretilen banyoda çözünme piki 0,3 V civarında görülmektedir. Daha sonra nanokompozit kaplama üretilen  $TiB_2$  ilave edilmiş banyo için çözünme piki, indirgenme tarafında olduğu gibi, yüksekliği saf nikelde göre daha da azalmış ve bir miktar pozitif tarafa kaymıştır.

Şekil 5'te paslanmaz çelik altlık, saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/ $TiB_2$  nanokompozit kaplamaların

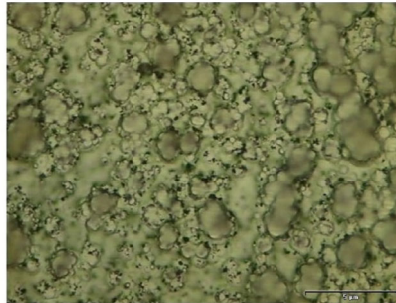
mikro sertlik değerleri verilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri paslanmaz çelik için 203 Hv, saf nikel için 290 Hv, Ni-B alaşım için 400 Hv ve Ni-B/ $TiB_2$  nanokompozit kaplama için ise 700 Hv olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, banyoya eklenen bileşenler mikro sertliğin artmasına sebep olmuştur. Banyoya TMAB eklenmesi neticesinde nikel ana yapısına dahil olan bor atomları sertlik değerinin yaklaşık olarak %38 oranında artmasına sebep olmuştur. Sheu ve arkadaşları [34] elektrodepolanmış Ni-B alaşımları için sertleşme mekanizmasını incelemişler ve sertlik artışının katı çözelti sertleşmesi ve tane boyu küçülmesinden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Banyoya titanyum diborür parçacıklarının ilavesi ile birlikte ise sertlik değeri saf nikelde göre yaklaşık olarak %140 oranında, Ni-B alaşım kaplamaya göre ise yine yaklaşık olarak %75 oranında artışa sebep olduğu görülmektedir. Parçacık takviyeli kompozitlerde sertlikte artışın temel nedenlerinden biri bu parçacıkların ana yapı içerisinde çizgi kusurları (dislokasyon) hareketlerini engellemesidir. Bu durum genel olarak dayanımda ve sertlikte artışa sebep olmaktadır [6].



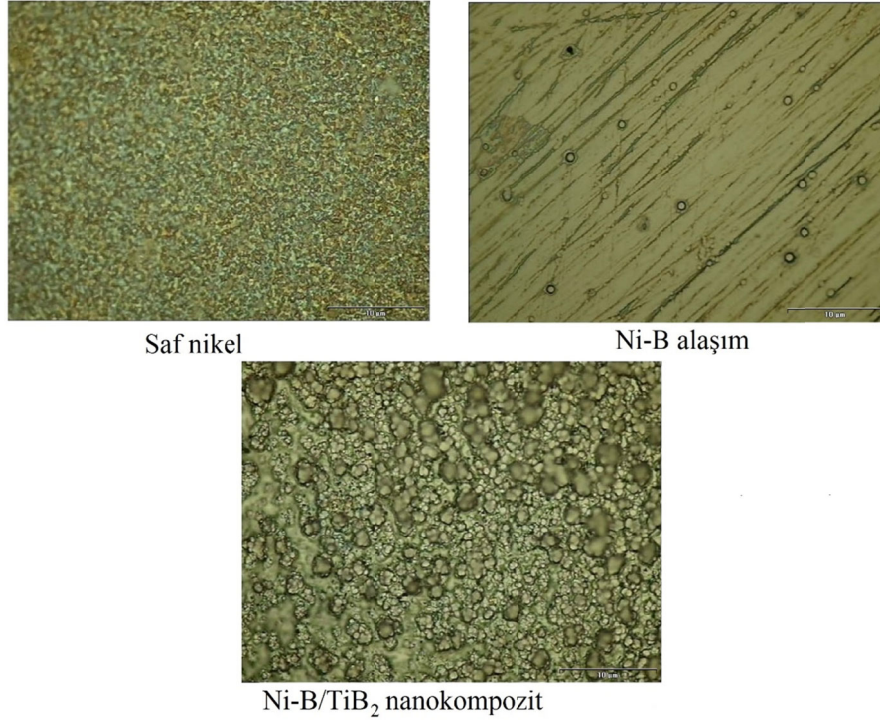
Saf nikel



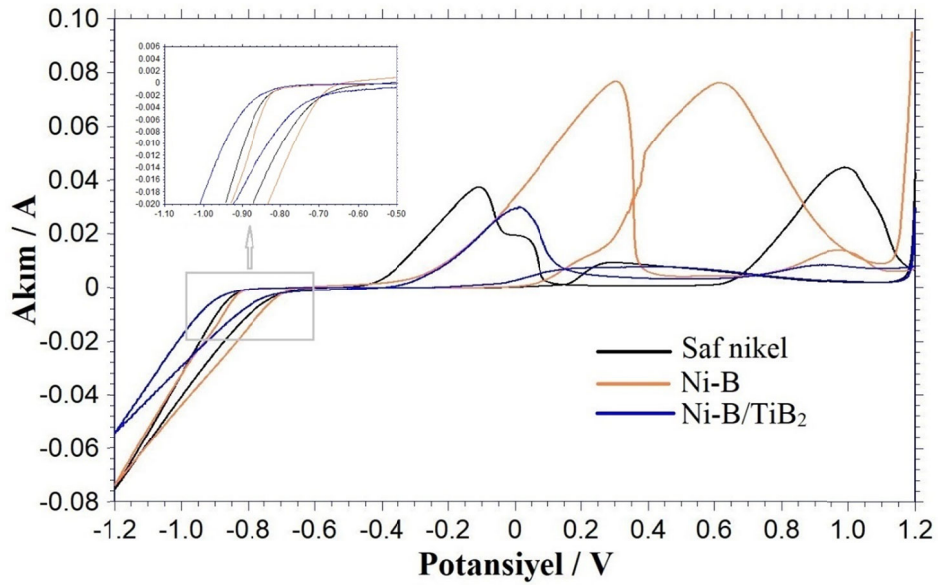
Ni-B alaşım



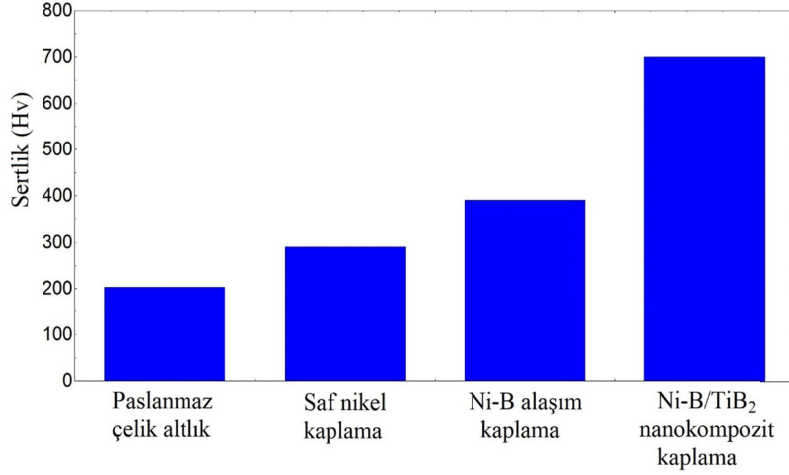
Ni-B/ $TiB_2$  nanokompozit



Şekil 3. Saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların optik mikroskop resimleri (üstte 1000x, altta 500x büyütme)



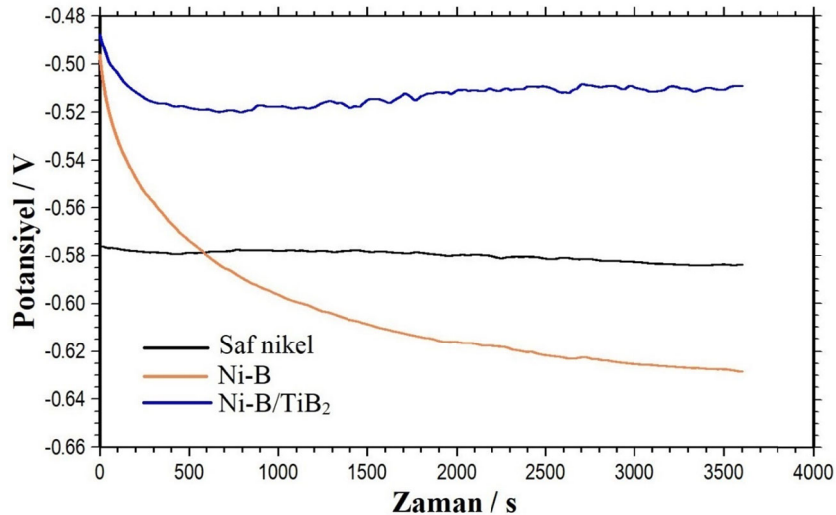
Şekil 4. Saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların dönüşümlü voltametri (CV) grafikleri



Şekil 5. Paslanmaz çelik altlık, saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların mikro sertlik değerleri

Şekil 6’da Saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların açık devre potansiyel (OCP) değerleri verilmiştir. İyonik bir çözeltiden ölçülen potansiyel değeri katodik ve anodik reaksiyonların denge potansiyelidir ve bu ortam korozif bir ortam ise ölçtüğümüz bu voltajı korozyon potansiyeli olarak kabul edebiliriz. Açık devre potansiyeli grafiklerinde pozitif tarafa daha yakın olan eğrilerin numunelerinin korozyon dayanımlarının daha yüksek olduğu bilinmektedir

[35,41]. Şekil 6 incelendiğinde saf nikel üretim banyosuna TMAB eklenerek üretilen Ni-B alaşımının korozyon performansının düşüş gösterdiği görülmektedir. Ana yapıya bor atomlarının dahil olması korozyon dayanımını kötü etkilemiştir. Bu duruma borun kristal yapıda iç gerginliklere sebep olması neticesinde ortaya çıkan mikro ve makro çatlakların sebep olduğu söylenebilir.



Şekil 6. Saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/TiB<sub>2</sub> nanokompozit kaplamaların açık devre potansiyel (OCP) değerleri

Şekil 7’de bu kırık ve çatlaklı durumun yüzey görüntüsü verilmiştir. Banyoya eklenen  $TiB_2$  parçacıklarının kaplamaya dahil olması ile birlikte korozyon dayanımının da artış gösterdiği Şekil 6’da nanokompozit kaplamaya ait OCP eğrisinin daha pozitif tarafa kaymasından anlaşılmaktadır. Ni-B alaşım ana yapıya dahil olan  $TiB_2$  parçacıkları hem kaplamanın daha tok olmasına hem de korozyona daha dayanıklı olmasına neden olmuştur. Korozyon dayanımındaki bu gelişme, kompozit kaplamanın yüzeyi üzerindeki çatlakların, boşlukların ve

mikron boyutunda deliklerin  $TiB_2$  parçacıkları tarafından doldurularak fiziksel bir bariyer görevi görmesinden dolayı olduğu öne sürülebilir [42]. Korozyon dayanımının artmasıyla ilgili diğer bir görüş ise elektrokimyasal kaplama işlemi esnasında tanecik sınırlarında iyi bir şekilde dağılım gösteren takviye parçacıklar kaplamadaki kusurları azaltmaktadır ve kaplamayı daha kompakt ve daha az geçirgen hale getirmektedir. Bu durum ise korozyon dayanımında artışa sebep olmaktadır [43].



Şekil 7. Ni-B alaşım kaplamanın kırık ve çatlaklardan oluşan yüzey morfolojisi

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/ $TiB_2$  nanokompozit kaplamalar elektrokimyasal depolama metodu ile üretilmiştir. Alaşım kaplama ve nanokompozit kaplama elde edebilmek için banyoya eklenen her bir bileşenin kaplama özelliklerine etkileri çeşitli analiz teknikleri ile incelenmiştir. Elde edilen kronopotansiyometri grafiklerine göre saf nikel ve nanokompozit kaplamalardaki potansiyel değişiminin alaşım kaplama banyosuna göre daha yatay ve stabil bir seyir izlediği söylenebilir. CV diyagramlarına göre ise nanokompozit kaplamanın elde edildiği

banyoda depolanma akımı artış hızının diğer banyolara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Genel olarak elde edilen kaplamaların pürüzsüz olduğu görülürken, kendi içinde karşılaştırıldıklarında bor takviyesi yüzey morfolojisinin daha pürüzsüz olmasına,  $TiB_2$  takviyesi ise daha pürüzlü olmasına neden olmuştur. Hem bor takviyesi hem de  $TiB_2$  takviyesi saf nikelde göre ciddi derecede mikro sertlik artışına sebep olmuştur. Korozyon performansı açısından bor olumsuz bir etkiye sahipken  $TiB_2$  parçacıklarının olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Saf nikel anayapısı üzerinde bor ve  $TiB_2$  takviyesi ile ilgili elde edilebilecek



gelişmelerin daha detaylı irdelenmesi adına daha fazla deney ve analiz yapılması gerektiği görülmektedir. Bu kaplamalarla ilgili bundan sonraki çalışmalarda bu eksiklikler göz önüne alınarak daha fazla bilimsel çalışma yapılabilir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Tozar, A., Karahan, İ.H., 2020. Effect of Octylphenyl Ether Group Nonionic Surfactant on the Electrodeposition of the Hexagonal Boron Nitride Reinforced Ni-B Matrix Composite Coatings, *Surface & Coatings Technology*, 381, 125131.
2. Baosong, L., Xiao, L., Yuxing, H., Wenzhe, X., Weiwei, Z., 2018. Influence of Alumina Nanoparticles on Microstructure and Properties of Ni-B Composite Coating, *Journals of Alloys and Compounds*, 762, 133-142.
3. Dandan, L., Baosong, L., Shengsong, D., Weiwei, Z., 2019. Synthesis of a Novel Ni-B/YSZ Metal-ceramic Composite Coating Via Singlestep Electrodeposition at Different Current Density, *Ceramics International*, 45, 24884–24893.
4. García-Aguirre, C.A., Domínguez-Ríos, C., Torres-Sánchez, R., Román-Aguirre, M., Holguín-Momaca, J.T., Aguilar-Elguézabal, A., 2015. Microstructure and Transmission Electron Microscopy Characterization of Electroless Ni-B Thin Films Deposited on MWCNTs, *Surface & Coatings Technology*, 282, 107–114.
5. Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U., Wang, Y., Gao, W., 2014. Properties of Electrodeposited Ni-B-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings, *Materials & Design*, 64, 127–135.
6. Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2014. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-CeO<sub>2</sub> Composite Coatings *Materials & Design*, 59, 421–429.
7. Kanani, N., 2004. *Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice*, Elsevier Advanced Technology, Oxford, U.K.
8. Srivastava, M., William, G.V., Rajam, K.S., 2007. *Electrochemical Deposition and Tribological Behaviour of Ni and Ni-Co Metal Matrix Composites with SiC Nano-particles*. *Applied Surface Science*, 253, 3814.
9. Singh, V.B., Singh, D.K., 2014. An Overview on the Preparation, Characterization and Properties of Electrodeposited-Metal Matrix Nanocomposites, *Nano sci Technol* 1 (3), 1-20.
10. Koch, C.C., 2007. *Structural Nanocrystalline Materials: An Overview*, *J. Mater. Sci.* 42, 1403.
11. Shakoor, R.A., Kahraman, R., Waware, U.S., Wang, Y., Gao, W., 2014. Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-Zn Ternary Alloy Coatings, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9, 5520.
12. Ünal, E., Yaşar, A., Karahan, İ.H., 2019. A Review of Electrodeposited Composite Coatings with Ni-B Alloy Matrix, *Materials Research Express*, 6, 092004.
13. Ünal, E., Karahan, İ.H., 2018. Production and Characterization of Electrodeposited Ni-B/hBN Composite Coatings, *Surface & Coatings Technology*, 333, 125-137.
14. Ünal, E., Karahan, İ.H., 2018. Investigation of Effect of the Bath Components on Coating Properties in Electrodeposition of Ni, Ni-B and Ni-B/hBN Coatings, *Sakarya University Journal of Science*, 22 (2), 663-672.
15. Ünal, E., Karahan, İ.H., 2018. Effects of Ultrasonic Agitation Prior to Deposition and Additives in the Bath on Electrodeposited Ni-B/hBN Composite Coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 763, 329-341.
16. Tozar, A., Karahan, İ.H., 2019. Investigation of the Mechanical Properties of Ni-B/hBN Composite Coatings Electrodeposited in Presence of CTAB as the Surfactant, *Materials Research Express*, Volume 6, Number 12.
17. Baosong, L., Weiwei, Z., 2020. Facile Synthesis and Electrochemical Properties of a Novel Ni-B/TiC Composite Coating Via Ultrasonic-assisted Electrodeposition, *Ultrasonics-Sonochemistry* 61, 104837.
18. Hosseini, M.G., Ahmadiyeh, S., Rasooli, A., 2019. Pulse Plating of Ni-B/WC Nanocomposite Coating and Study of its Corrosion and Wear Resistance, *Materials Science and Technology*, 35(10), 1248-1256.
19. Ahmadiyeh, S., Rasooli, A., Hosseini, M.G., 2019. Ni-B/SiC Nanocomposite Coating

- Obtained by Pulse Plating and Evaluation of its Electrochemistry and Mechanical Properties, *Surface Engineering*, 35(10), 861-872.
20. Li, B.S., Huan, Y.X., Luo, H., Zhang, W.W., 2019. Electrodeposition and Properties of Ni-B/SiC Nanocomposite Coatings, *Surface Engineering*, 35(2), 109-119.
  21. Mehr, M.S., Akbari, A., Damerchi, E., 2019. Electrodeposited Ni-B/SiC Micro- and Nano-composite Coatings: A Comparative Study, *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 477-487.
  22. Krishnaveni, K., Narayanan, T.S.N.S., Seshadri, S.K., 2008. Electrodeposited Ni-B-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composite Coating: Preparation and Evaluation of its Characteristic Properties, *J. of Alloys and Compounds*, 466, 412-420.
  23. Monteiro, O.R., Murugesan, S., Khabashesku, V., 2015. Electroplated Ni-B Films and Ni-B Metal Matrix Diamond Nanocomposite Coatings, *Surface & Coatings Technology*, 272, 291-297.
  24. Ogihara, H., Safuan, M., Saji, T., 2012. Effect of Electrodeposition Conditions on Hardness of Ni-B/diamond Composite Films, *Surface & Coatings Technology*, 212, 180-184.
  25. Shakoor, R.A., Waware, U.S., Ali, K., Kahraman, R., Popelka, A., Yusuf, M.M., Hasan, A., 2017. Novel Electrodeposited Ni-B/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings with Improved Properties, *Coatings*, 7, 161.
  26. Waware, S., Wasekar, N.P., 2017. Manufacture and Properties of Ni-B-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Nano-Coatings by Electrodeposition, *Journal of Material Sciences & Engineering*, 6, 6.
  27. Waware, U.S., Hamoudaa, A.M.S., Wasekar, N.P., 2018. Mechanical Properties, Thermal Stability and Corrosion Behavior of Electrodeposited Ni-B/AlN Nanocomposite Coating, *Surface & Coatings Technology*, 337, 335-341.
  28. Waware, U.S., Hamouda, A.M.S., Bajaj, B., Borkar, T., Pradhan, A.K., 2018. Synthesis and Characterization of Electrodeposited Ni-B-Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 769, 353-359.
  29. Ett, G., Pessine, E.J., 1999. Pulse Current Plating of TiB<sub>2</sub> in Molten Fluoride, *Electrochimica Acta*, 44, 2859-2870.
  30. Gyawali, G., Cho, S.H., Lee, S.W., 2013. Electrodeposition and Characterization of Ni-TiB<sub>2</sub> Composite Coatings, *Metals and Materials International*, 19(1), 113-118.
  31. Gyawali, G., Tripathi, K., Joshi, B., Lee, S.W., 2017. Mechanical and Tribological Properties of Ni-W-TiB<sub>2</sub> Composite Coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 757-763.
  32. Xiaozhen, L., Yifan, L., Lingling, S., Xiaowen, S., 2010. Preparation and Performance of Electrodeposited Ni-TiB<sub>2</sub>-Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings, *Journal of Rare Earths*, 28, 97.
  33. Xiaozhen, L., Xin, L., Aibing, Y., Weijue, H., 2009. Preparation and Tribological Performance of Electrodeposited Ni-TiB<sub>2</sub>-Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings, *Journal of Rare Earths*, 27(3), 480.
  34. Sheu, H.H., Tzeng, Y.C., Syu, J.H., 2019. Study of the Strengthening Mechanism of Electrodeposited Ni-B Thin Films with Ultra-low Boron Content, *Materials Letters*, 238, 275-277.
  35. Tozar, A., 2012. Düşük Karbonlu Çeliğin Çevreci ZnNi/Polianilin İletken Polimer ile Kaplanması ve Kaplanan Çeliğin Korozyon Davranışının İncelenmesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
  36. Lee, K.H., Chang, D., Kwon, S.C., 2005. Properties of Electrodeposited Nanocrystalline Ni-B Alloy Films, *Electrochimica Acta*, 50, 4538-4543.
  37. Lekka, M., Offioiach, R., Lanzutti, A., Mughal, M.Z., Sebastiani, M., Bemporad, E., Fedrizzi, L., 2018. Ni-B Electrodeposits with Low B Content: Effect of DMAB Concentration on the Internal Stresses and the Electrochemical Behaviour, *Surface & Coatings Technology*, 344, 190-196.
  38. Matsui, I., Omura, N., Yamamoto, T., Takigawa, Y., 2018. Electrodeposition with Intermittent Addition of Trimethylamine Borane to Produce Ductile Bulk Nanocrystalline Ni-B Alloys, *Surface & Coatings Technology*, 337, 411-417.
  39. Guglielmi, N., 1972. Kinetics of the Deposition of Inert Particles from Electrolytic Baths, *Journal of The Electrochemical Society*, 119 (8), 1009-1012.

40. Öztekin, K., 2014. Çinko Kaplanmış Karbon Çeliğinin Na-okzalat ve Na-tartarat Ortamlarında Polianilin ve Poli-o-anisidin ile Kaplanarak Korozyon Direncinin Geliştirilmesi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
41. Tozar, A., Karahan, İ.H., 2014. Structural and Corrosion Protection Properties of Electrochemically Deposited Nano-sized Zn-Ni Alloy Coatings, Appl. Surf. Sci. 318, 15-23.
42. Kasturibai, S., Kalaigan, G.P., 2014, Characterizations of Electrodeposited Ni-CeO<sub>2</sub> Nanocomposite Coatings, Materials Chemistry and Physics, 147, 1042-1048.
43. Wang, Y., Wang, S., Shu, X., Gao, W., Lu, W., Yan, B., 2014. Preparation and Property of Sol-Enhanced Ni-B-TiO<sub>2</sub> Nano-composite Coatings, J. of Alloys and Compounds, 617, 472-478.



## Yenilenebilir Enerji Kaynaklarında Sürekliliği Sağlamak için Optimum Enerji Karışımının Belirlenmesi: Kahramanmaraş Bölgesinde Bir Uygulama

İsrafil KARADÖL<sup>\*1</sup>, Ceyhun YILDIZ<sup>2</sup>, Hakan AÇIKGÖZ<sup>3</sup>, Mustafa ŞEKKELİ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Elektrik Bölümü, Kilis

<sup>2</sup>İstiklal Üniversitesi, Elektrik Enerjisi Üretimi, İletim ve Dağıtım Programı, K.Maraş

<sup>3</sup>G.Antep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, G.Antep

<sup>4</sup>K.Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, K.Maraş

Geliş tarihi: 18.02.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Yenilenebilir enerji santral (YES) üretimleri, iklim koşullarına bağlı olarak sürekli değişmektedir. Bu sürekli değişim şebekenin güç-frekans dengesi üzerinde bozucu etkilere neden olmaktadır. YES üretim değişimlerinin etkilerini azaltmanın üç farklı yolu vardır: Şebeke sistemlerini birbirine bağlamak, enerjiyi depolamak ve enerji kaynakları arasındaki zamansal tamamlamadan faydalanmaktır. Yapılan bu çalışmada üç farklı yenilenebilir enerji kaynağı arasındaki zamansal tamamlamadan faydalanılarak daha kararlı bir enerji karışımı elde edilmiştir. Çalışma Kahramanmaraş ili için gerçekleştirilmiştir. Hesaplamaların gerçeğe yakın olması amacıyla ilde işletilmekte olan üç farklı YES'ten (hidroelektrik santral (HES), güneş enerjisi santrali (GES) ve rüzgar e (RES)) gerçek üretim verileri alınmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda incelenen HES, GES ve RES enerjisi santrali üretimlerinin optimum karışım oranları sırasıyla %14, %56 ve %30 olarak elde edilmiştir. Kahramanmaraş İli'nde bu oranlar dikkate alınarak tesisler kurulursa üretimin daha kararlı bir hale geleceği görülmüştür. Bu durumda YES üretimlerinin geleneksel şebeke sistemlerinin, güç-frekans dengesi üzerindeki bozucu etkisi de azalacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Optimum enerji karışımı, Yenilenebilir enerji kaynakları, Enerji üretim kararlılığı

### Determination of the Optimal Energy Mix to Ensure Continuity in Renewable Energy Sources: an Application in the Kahramanmaraş Region

#### Abstract

Renewable energy power plant (REPP) generations varies continuously depending on climatic conditions. This continuous change causes disruptive effects on the frequency-power balance of the grid. There are three different ways to mitigate these effects of REPP generation changes: Connecting grid systems, storing energy and using the temporal completion between energy sources. In this study, a more stable energy mix was obtained by using the temporal completion between three different renewable energy sources. The study was carried out for Kahramanmaraş province. Data were obtained from three different (REPP) (hydroelectric power plant (HEPP), solar power plant (SPP) and wind power plant (WPP))

\*Sorumlu (Corresponding author) yazar: İsrafil KARADÖL, [israfilkaradol@kilis.edu.tr](mailto:israfilkaradol@kilis.edu.tr)

operated in the province to make the calculations more realistic. As a result of the calculations, optimum mix rates of investigated HEPP, SPP and WPP generations were obtained as 14%, 56% and 30% respectively. In Kahramanmaraş province, it is seen that if the plants are installed by taking these rates into consideration, production will become more stable. In this case, the disruptive effect of REPP generations on the frequency-power balance of traditional grid systems will also be reduced.

**Keywords:** Optimal energy mix, Renewable energy resources, Energy generation stability

## 1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler günden güne hayatımızın her alanına daha çok etki etmektedir. Otomobil, giyim, spor, ev aletleri vb. birçok alandaki gelişmeler insanoğlunun memnuniyet noktasını daha yukarılara taşımıştır [1]. Gelişen bu teknoloji ile beraber teknolojinin kullanım alanlarının artması, enerjiye olan talebi de arttırmıştır. Bu nedenlerden dolayı geleneksel enerji kaynaklarının (kömür, petrol, linyit vb.) kullanımı da artmıştır [2]. Geleneksel enerji kaynaklarının fazla miktarlarda kullanımı bu kaynakların tükenme sorununu ön plana taşımıştır [3]. Ayrıca bu kaynakların aşırı kullanımı çevre kirliliğine, sera gazlarının artmasına ve enerji kaynağının ithal edilmesinden dolayı dışa bağımlılığın artışı gibi birçok soruna neden olmaktadır [4]. Tüm bu nedenlerden dolayı devletler geleneksel enerji kaynaklarının yerini alabilecek alternatif enerji kaynaklarına (su, güneş, rüzgar, vb.) yönelmişlerdir. Bu kaynakların sürdürülebilir olması ve devletlerin sınırları içerisinde yer alması, ülkelerin dışa bağımlılığını azaltmasından dolayı bu kaynakların önemini daha da arttırmıştır [5]. Ayrıca bu kaynakların geleneksel enerji kaynaklarına kıyasla, çevresel etkileri daha azdır [6].

Yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) arasında en fazla kullanılanlar hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjileridir. Son yıllarda bu kaynakların etkin kullanımı konusunda ülkemizde de hızlı gelişmeler olduğu görülmektedir [7]. Bu kaynaklardan üretilen elektriksel enerji, geleneksel şebeke sistemlerinin esnekliği ve güvenliği açısından bozucu etkiler oluşturmaktadır. Bu bozucu etki, YEK tesislerindeki üretimlerin iklimsel koşullara bağlı olarak anlık değişimler göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Konu ile ilgili yapılan literatür taramasında bazı çalışmaların öne çıktığı görülmüştür. Wu ve arkadaşları; GES tesislerinin geleneksel bir şebekeye, şebeke kurulu gücünün %5, %10, %20 ve %30 oranlarında dahil edilmesi durumunda oluşacak etkiyi incelemişlerdir. Herhangi bir arıza durumunda GES tesis kurulu güç oranı ile şebeke frekansındaki bozulmanın paralellik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [8]. Eftekharijad ve arkadaşları; çalışmalarında kurulu gücü 21 GW ve talep gücü 13 GW olan geleneksel bir şebeke sistemi üzerinde incelemeler yapmışlardır. Bu şebeke sistemine 20 farklı oranda GES tesisi dahil ederek, şebekedeki herhangi bir arıza sonucunda frekansın bozulmasını bu oranlara göre değerlendirmişlerdir. Değerlendirmeler sonucunda GES kurulu güç oranı arttıkça, şebekenin frekans bozukluğundaki toparlanmanın da geciktiği görülmüştür [9]. Vong ve arkadaşları; yaptıkları çalışmada farklı GES kurulu güçlerinde oluşan kısa ve uzun süreli şebeke arızalarındaki frekans bozulmalarını incelemişlerdir. GES kurulu gücünün artmasıyla şebekenin frekans kontrolünün zorlaştığı sonucuna ulaşmışlardır [10]. Demirel ve Demirel yaptıkları çalışmada benzetim programları yardımıyla RES dahil edilen geleneksel bir şebeke modeli oluşturmuşlardır. Bu model üzerinden geleneksel şebeke sistemine RES eklenerek herhangi bir arıza durumunda şebekenin frekans tepkisini, aktif ve reaktif güç kontrol performanslarını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda geleneksel bir şebekedeki YEK tesisi sayısının artması durumunda mevcut enerji santrallerinin frekans kontrol rezervlerinin artırılmasına ihtiyaç duyulabileceği görülmüştür [11]. Wang ve arkadaşlarının çalışmalarında, GES ve RES üretimlerinin şebeke üzerindeki etkileri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda şebekedeki frekans kararlılığının sağlanabilmesi için şebekenin kurulu gücüne göre belirli bir oranda GES ve RES dahil edilebileceği sonucuna

ulaşmışlardır. Bu oranın üzerinde GES ve RES eklenmesi durumunda ise GES ve RES üretimine bağlı olarak şebeke frekansında bozulmalar meydana geldiğini belirtmişlerdir [12]. Bu çalışmalarında YEK'lerin geleneksel şebeke sistemleri üzerindeki bozucu etkileri gösterilmiştir. Literatürdeki bazı çalışmalar bu bozucu etkinin farklı YEK'ler arasındaki zamansal tamamlamadan faydalanılarak azaltılabileceğini ortaya koymuştur. yönünü ve büyüklüğünü belirlemek amacıyla korelasyon analizi yapılmıştır. RES ve GES üretimlerinin zamansal tamamlama oranlarının konuma göre değişkenlik gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır [14]. Karadöl ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Malatya ilinde yer alan HES üretimleri ile Pvsyst (Photovoltaic System) yazılımı üzerinden elde edilmiş GES üretimleri arasındaki ilişkinin yönü ve büyüklüğü belirlenmiştir. Daha sonra bu iki tesis üretimlerinin daha kararlı olması amacıyla, tesisler arasındaki optimum karışım oranı belirlenmiştir [15]. Schmidt ve arkadaşları yaptıkları çalışmada YEK'ler ile Brezilya'nın enerji talebini karşılayabilecek optimum enerji karışım oranlarını araştırmışlardır. Bu amaçla benzetim programları üzerinde Brezilya'nın farklı konularında farklı iklimler için GES ve RES'leri modellemişlerdir. Bu modellemelerde, elde edilen veriler ile mevcut akarsu verileri birleştirilmiştir. Santrallerin kurulduğu bölgelerde enerji talebini sürekli olarak karşılayabilmek için pompaj depolamalı HES'lere ihtiyaç duyulduğu ortaya koyulmuştur [16]. Literatür taraması sonucunda konu ile ilgili çok az sayıda çalışma yapıldığı ve Türkiye'de ise sadece Karadöl ve arkadaşları tarafından, Malatya ili için bir çalışma yapılmış olduğu görülmüştür. Bu çalışmada da gerçek bir HES üretimleri ile Pvsyst yazılımından elde edilen üretimler incelenmiştir. YEK potansiyeli yüksek bir ülke olan Türkiye için bu tip çalışmaların gerçek üretim değerleri kullanılarak farklı bölgeler için de yapılmasına ihtiyaç olduğu açıktır.

Bu çalışmada, Kahramanmaraş bölgesindeki farklı YEK üretimlerinin zamansal tamamlamasından faydalanılarak enerji üretiminde sürekliliğin sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle

Dos Anjos ve arkadaşları yaptıkları çalışmada GES ve RES üretimleri arasındaki korelasyon analizini incelemişlerdir. Bu incelemeler sonucunda bu iki kaynak arasındaki ilişkinin yönünü ve büyüklüğünü belirleyerek kaynaklar arasındaki zamansal tamamlamayı göstermişlerdir [13]. Silva ve arkadaşları çalışmalarında 12 adet RES ve 12 adet GES üretimleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Tesisler arasındaki ilişkinin bölgedeki YEK üretimlerinin temsil eden birer HES, GES ve RES belirlenmiştir. HES, GES ve RES kurulu güçleri sırasıyla 8 MW, 1MW ve 27,5 MW'dır. Belirlenen tesislerin kurulu güçlerinin farklı olmasından dolayı üretim değerleri tesislerin kurulu güçlerine bölünerek per-unit'e (pu) çevrilmiştir. Daha sonra tesislerin zamansal tamamlamasından faydalanabilmek amacıyla HES, GES ve RES üretimleri arasındaki optimum karışım oranı belirlenmiştir. Bu optimum karışım oranı HES, GES ve RES için sırasıyla %14, %56 ve %30 olarak elde edilmiştir. Kahramanmaraş bölgesinde bu oranlarda tesisler kurulursa YEK üretimlerinin kararlı bir hale gelebileceği görülmüştür. Bu çalışmanın literatüre katkısı, ilk defa Türkiye'de gerçek tesis üretimleri kullanılarak üç farklı YEK tesisinin enerji üretiminde sürekliliği sağlayacak bir optimum enerji karışımının belirlenmesi olmuştur.

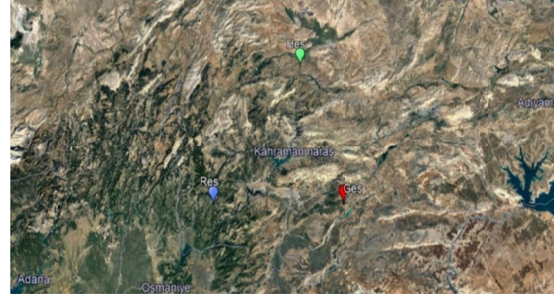
Bu makale dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, yapılan çalışma hakkında genel bilgiler ve literatürde yer alan önceki çalışmaların özetleri verilmiştir. İkinci bölümde, çalışmada incelenen tesis konuları ve tesislere ait teknik özellikler anlatılmıştır. Ayrıca optimum enerji karışımı hesabında kullanılan yöntem de bu bölümde anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, yapılan araştırmalarda sonucunda elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Dördüncü bölümde ise elde edilen bulgular yorumlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

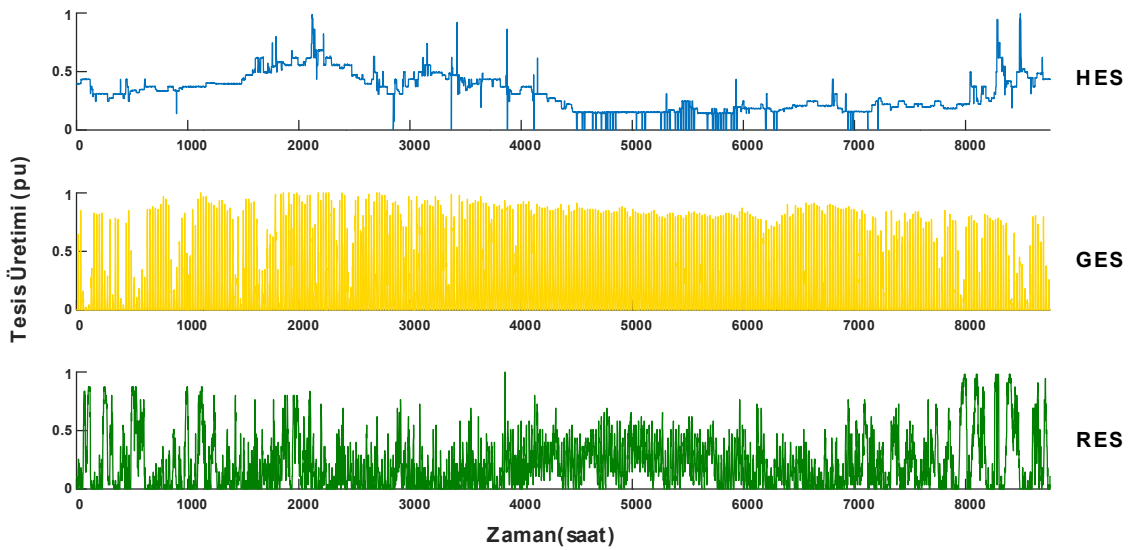
### 2.1. İncelenen Tesisler

Yapılan bu çalışmada Kahramanmaraş'ta işletilmekte olan üç farklı YEK tesisi üretimi

arasındaki optimum karışım belirlenmeye çalışılmıştır. İncelenen tesislerin konumları Şekil 1'deki harita üzerinde gösterilmiştir. Gösterilen konumlardaki HES, GES ve RES sırasıyla Kahramanmaraş'ın Afşin, Pazarcık ve Andırın ilçelerinde yer almaktadır. Ayrıca Şekil 2'de incelenen tesislerin 2018 yılına ait saatlik üretimleri verilmiştir. Bu tesisler bölgedeki YEK rejimlerini temsil etmesi amacıyla pilot olarak seçilmiştir. İlerleyen alt bölümlerde tesislere ilişkin bazı teknik detaylar verilmiştir.



Şekil 1. Tesis konumları



Şekil 2. Tesislerin 2018 yılına ait saatlik üretimler

### 2.1.1. Hidroelektrik Santral

HES'ler olgun teknolojileri ve çevre dostu olmaları sebebiyle yaygın olarak kullanılan enerji dönüşüm sistemleridir. HES'ler kendi arasında barajlı ve nehir tipi olmak üzere iki guruba ayrılmaktadır. Barajlı HES üretimleri talep yüküne göre ayarlanabilmektedir [17]. Bu sayede barajlı HES'ler şebeke üzerinde herhangi bir bozucu etkiye neden olmamaktadır. Fakat nehir tipi HES'ler ise suyun akış debisine bağımlı olarak enerji üretmektedirler [18,19]. Su akışının kontrol edilememesinden dolayı bu tip tesis üretimlerindeki kararsızlık, şebekenin esnekliğini ve güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir [20-23].

Yapılan bu çalışmada, Kahramanmaraş/Elbistan ilçesi, Ceyhan Nehri kolu üzerine kurulu bir nehir tipi HES incelenmiştir. İncelenen tesisi ait görüntü Şekil 3'te verilmiştir. Ayrıca bu tesise ait bazı teknik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir.



Şekil 3. Hidroelektrik santral



**Çizelge 1.** HES teknik özellikleri

Tesis Özellikler	
Kurulum Yılı	2016
Türbin Adeti	2
Türbin Tipi	Kaplan
Düşü Yüksekliği (m)	23,1 m
Kurulu Güç (MW)	8
Senelik Üretim (GWh)	27,6

### 2.1.2. Güneş Enerjisi Santrali

Gelişen dünyada, nüfusun artmasıyla beraber sanayi ve teknolojide enerjiye duyulan ihtiyaçta giderek artmaktadır. [24,25]. Artan enerji ihtiyacını geleneksel enerji kaynaklarından (kömür, petrol, vs.) karşılamak hem sürdürülebilirlik açısından hem de çevre açısından birçok sorunu beraberinde getirmektedir [7,26]. Bu nedenlerden dolayı ülkeler geleneksel enerji kaynaklarının yerini

alabilecek ve çevreye daha az zarar verecek alternatif enerji kaynaklara yönelmişlerdir. Alternatif enerji kaynakları arasında en büyük potansiyele sahip enerji kaynağı güneş enerjisidir. Aynı zamanda güneş enerjisinin sürdürülebilir ve temiz olması bu enerji kaynağının önemini daha da artırmıştır [27]. Tüm bu nedenlerden dolayı ülkeler artan enerji taleplerini, güneşten karşılamaya yönelmişlerdir. Fakat güneş enerjisinden üretilen elektriksel enerjinin şebekeye aktarılması esnasında bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. GES üretimlerini etkileyen meteorolojik parametrelerin ani şekilde değişiklik göstermesi tesis üretimlerinde ani değişimlere neden olmaktadır. Enerji üretimindeki ani düşüşler ve yükselmeler geleneksel şebeke sistemleri üzerinde bozucu etkilere neden olmaktadır.



**Şekil 4.** Güneş enerjisi santrali

Yapılan bu çalışmada incelenen GES konum olarak Kahramanmaraş/Pazarcık İlçesi'nde bulunmaktadır. Bu tesisi ait görüntü Şekil 4'te verilmiştir. Ayrıca tesise ait teknik özellikler Çizelge 2'de özetlenmiştir. Tüm bu teknik özelliklere ek olarak panellerin güneşlenme süresini en üst seviye tutabilmek amacıyla, panellerin yüzeyle yaptığı açı  $33^{\circ}$ 'dir ve arazi yüzeyinden dolayı ise panellerin azimut açısı  $-7^{\circ}$ 'dir.

**Çizelge 2.** GES teknik özellikleri

Özellik	Değer veya Tür
Panel türü	Polikristal Silikon
Panel markası	Yingli Solar YL260P-35b
Panel çıkış gücü (W)	260
Panel Adeti	3960
Evirici markası	ABB
Evirici modeli	TRIO-27,6-TL-OUTD
Evirici nominal çıkış gücü (W)	27600
Evirici maksimum Çıkış gücü (W)	30000
Evirici adeti	33

### 2.1.3. Rüzgâr Enerji Santrali

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları arasında ticari anlamda en ekonomik enerji türüdür [28]. Rüzgâr enerjisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kıyasla daha ekonomik olmasının doğal sonucu olarak rüzgâr enerjisi sektörü hızla gelişmiş ve büyümüştür. Türkiye’de, rüzgâr enerjisi yarışındaki yerini alarak bu sektör için gerekli atılımları yapmıştır. 2015 yılında RES kurulu gücü 4,503 MW iken 2018’de RES kurulu gücü 6,620 MW’dır [29]. Rüzgâr enerji sektöründe

bu denli büyük gelişmeler yaşanmasına rağmen bu enerji kaynağının geleneksel şebeke sistemlerine dâhil edilmesi şebekenin esnekliği ve güvenliği açısından bazı sorunlara neden olmaktadır. Çünkü rüzgâr enerjisindeki ani üretim değişimleri kontrol edilememektedir. Bu durum şebekenin güç-frekans dengesini bozmaktadır. Yapılan bu çalışmada incelenen RES, Kahramanmaraş/Andırın İlçesi’ndedir. Bu tesise ait görüntü Şekil 5’te verilmiştir. Ayrıca bu tesise ait teknik özellikler Çizelge 3’te özetlenmiştir.



Şekil 5. Rüzgâr enerjisi santrali

Çizelge 3. RES teknik özellikleri

Tesis özellikleri	
Kurulum yılı	2015
Türbin adeti	12
Türbin markası	Nordex
Türbin çıkış gücü (MWm)	2,4
Kanat sayısı	3
Kule yüksekliği (m)	91
Kanat çapı (m)	117
Süpürme alanı (m <sup>2</sup> )	10715
Tesis kurulu gücü (MWm)	28,8
Senelik üretim (GWh)	70,0

### 2.2. Optimum Enerji Karışımının Belirlenmesi

Bu çalışmada yapılan hesaplamalarda Kahramanmaraş’ta faaliyet gösteren üç farklı YEK

tesisinin 2018 yılına ait saatlik üretimleri kullanılmıştır. Bu tesislerin Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4’teki yıllık üretim grafiklerini incelediğimizde kararsız bir üretime sahip oldukları görülmektedir. HES yıllık üretimine baktığımızda kış ve ilkbahar aylarında ortalama olarak 0,4 pu civarında üretim gerçekleşirken, yaz ve sonbahar aylarında ise bu üretimin ortalama 0,2 pu ve altındaki değerlerde üretimler gerçekleşmiştir. GES yıllık üretimlerini incelediğimizde, kış ve ilkbahar aylarındaki üretimlerde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Fakat yaz ve son bahar aylarındaki üretimlerde ise daha az değişimler gerçekleşmiştir. RES yıllık üretimini incelediğimizde ise ilkbahar, sonbahar ve kış aylarında çok fazla dalgalanma gösterirken, yaz aylarında üretimin çok fazla değişkenlik göstermediği görülmektedir. Sonuç olarak bu üç tip tesis üretimlerinin zamana bağlı olarak değişen kararsız bir yapıda olduğu görülmüştür. Tesis

üretimlerindeki bu değişkenlik ve kararsızlık geleneksel şebeke sistemlerindeki güç-frekans dengesi üzerinde bozucu bir etkiye neden olmaktadır.

HES, GES ve RES için optimum enerji karışım oranı belirlenerek, bu tesislerin üretimlerindeki kararsızlığın ve dengesizliğin minimum seviyeye indirgenmesi amaçlanmaktadır. HES, GES, RES ve  $P_{çık}$  değerlerindeki üretim kararlılığını belirlemek amacıyla üretimlerin standart sapmaları incelenmiştir. Standart sapma, olasılık teorisi ve istatistiksel analizlerde kullanılan sayısal verilerin veya değişkenlerin, ortalama değere ne kadar uzaklıkta olduğunu gösteren bir ölçüdür. Bir başka ifadeyle, değişkenlerin ne genişlikte bir aralıkta dağıldığını gösteren sayısal bir ifadedir. Yani herhangi bir veri setinin standart sapma değeri küçükse (sıfıra yakınsa) bu verilerin çok fazla değişkenlik göstermediğini (homojen dağıldığını) ifade etmektedir. Fakat standart sapma değeri büyükse (bire yakınsa) bu veri setinin çok fazla değişkenlik gösterdiğini (heterojen dağıldığını) ifade etmektedir. Standart sapmanın matematiksel olarak ifadesi Eşitlik 1'de verilmiştir. Eşitlik 1'deki n toplam terim sayısını ve xi ise her bir terimi ifade etmektedir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum \{x_i^2 - (\frac{1}{n} \sum x_i)^2\}} \quad (1)$$

Tesisler arasındaki optimum enerji karışım oranını belirlemek için ise Eşitlik 2 kullanılmıştır [27,30]. Eşitlikte kullanılan  $P_{çık}$  değeri RES, HES ve GES karışımları sonucunda ortaya çıkan üretimi ifade etmektedir.

$$P_{çık} = \{\alpha.RES + (1-\alpha).(\beta.GES + (1-\beta).HES)\} \quad (2)$$

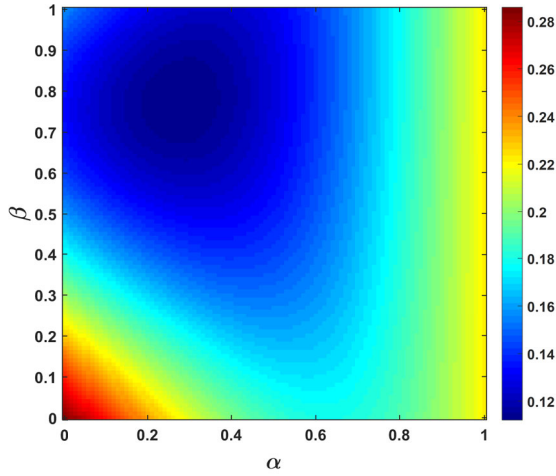
Eşitlik 2'de verilen  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri, 0 ile 1 aralığında değiştirilerek, 10201 adet  $P_{çık}$  değer vektörleri elde edilmiştir.  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin değişim duyarlılığı 0,01 olarak seçilmiştir [27], [30].  $P_{çık}$  denklemindeki her bir tesis katsayısı optimum  $\alpha$  ve  $\beta$  parametreleri eşitlikte yerine yazılarak elde edilmiştir. Bu durumda RES, GES ve HES katsayıları sırasıyla  $\alpha$ ,  $(1-\alpha).\beta$  ve

$(1-\alpha).(1-\beta)$  olmuştur. Bu katsayılar tesislerin optimum karışımındaki yüzdelik paylarını vermektedir.

### 3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

#### 3.1. Optimal Enerji Karışımı

HES, GES ve RES tesisleri arasındaki optimum enerji karışım oranının belirlenmesi amacıyla, MATLAB programında Eşitlik 2'deki  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin tüm değerleri için üç boyutlu ( $101 \times 101 \times 8760$  değerden oluşan)  $P_{çık}$  vektörleri elde edilmiştir. Elde edilen  $P_{çık}$  vektöründeki, ilk iki boyut ( $101 \times 101$ )  $\alpha$  ve  $\beta$ 'nin aldığı değerleri ( $0 < \alpha < 1$ ), ( $0 < \beta < 1$ ) ve 8760 vektörü ise tesislerin saatlik üretim verilerini ifade etmektedir.  $P_{çık}$  vektörü elde edilirken  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri 0,01 hassasiyetle artırılarak, 0'dan 1'e kadar tüm değerler için  $P_{çık}$  vektörleri elde edilmiştir. Elde edilen bu vektörün 10201 adet sonucu olup, bu sonuçların tek tek incelenmesi mümkün değildir. Bu nedenle, en kararlı üretime sahip  $P_{çık}$  vektörünü bulmak için  $P_{çık}$  vektörünün standart sapmaları incelenmiştir [27,30-32]. Bu vektörlerin standart sapmalarının  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerine göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da gösterilen  $P_{çık}$  vektörüne ait tüm sonuçların standart sapmaları incelendiğinde en yüksek değer 0,3043 (kırmızı) ve en düşük değer 0,1132 (lacivert) olduğu görülmüştür.  $P_{çık}$  vektörleri arasında en küçük standart sapmaya sahip olan vektörün,  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin sırasıyla 0,30 ve 0,80 olması durumunda elde edildiği tespit edilmiştir. Elde edilen en küçük standart sapmaya sahip  $P_{çık}$  vektörünün yıllık tesis üretimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Ayrıca her bir tesise ait üretimlerin ve optimum enerji karışımının üretiminin standart sapmaları Çizelge 4'te verilmiştir. Bölgede kurulu HES üretimlerinin standart sapmasının küçük olması, HES üretiminin diğer kaynaklara oranla daha kararlı bir yapıya olduğunu göstermektedir. Fakat çözümü gerçekleştirilen optimum karışım denkleminin sonucunda daha küçük standart sapmaya sahip bir üretim çıktısı elde edilmiştir.

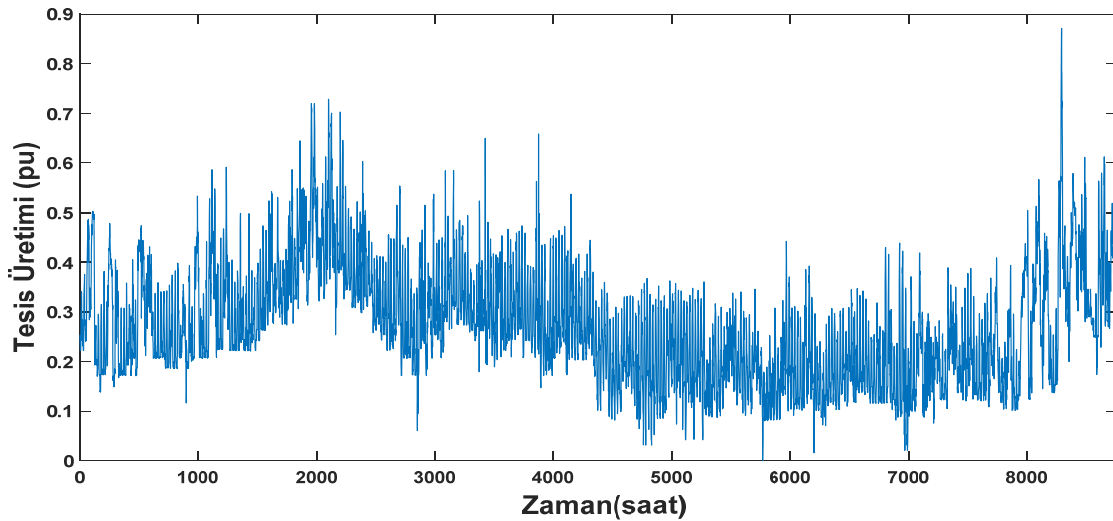


Şekil 6.  $P_{çık}$  standart sapma grafiği

Çizelge 4. HES, GES, RES ve optimum enerji karışımının standart sapma değerleri

Tesisler	HES	GES	RES	Optimum Karışım
Standart Sapma	0,1567	0,3043	0,2210	0,1132

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ışığında farklı HES, GES ve RES karışım oranlarının farklı standart sapma değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Fakat bu sonuçları bu üç tip tesis üretimleri için genelleştirmek doğru olmayacaktır. Çünkü farklı bölgelerdeki tesislerin üretim karakteristikleri iklimsel özelliklere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu durum ilgili literatürde alınan sonuçlarda da görülmektedir [15,27,30].



Şekil 7. Optimum enerji karışım üretim çıktısı

#### 4. SONUÇ

YEK tesislerinin şebekeye entegrasyonunda yaşanan sorunların en önemlilerinden biri şebekedeki güç-frekans dengesinin bozulmasıdır. Bu bozulma YEK tesislerinin süresiz üretimlerinden kaynaklanmaktadır. Yapılan bu çalışmanın amacı farklı YEK'ler ile beslenen tesis üretimlerinin, belirli oranlar da karıştırılması ile YEK tesislerindeki enerji üretim sürekliliğini sağlamaktır. Bu kapsamda öncelikle Kahramanmaraş'ta işletilmekte olan üç farklı YEK

tesisi (HES, GES, RES) incelenmiştir. İnceleme sonucunda tesis üretimlerinin sürekli olmadığı ve kararsız bir şekilde değişimler gösterdiği görülmüştür. Tesis üretimlerindeki bu kararsızlık, üretimlerin standart sapmaları incelendiğinde daha net görülmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda HES, GES ve RES üretimlerinin standart sapmaları sırasıyla 0,1567, 0,3043 ve 0,2210 olarak bulunmuştur. Kararsız YEK tesis üretimlerini daha kararlı hale getirebilmek amacıyla tesis üretimleri arasındaki optimum karışım, çalışmada önerilen denklem kullanılarak

hesaplanmıştır. Denklemdaki  $\alpha$  ve  $\beta$  parametrelerinin tüm değerleri için  $P_{çık}$  vektörünün standart sapması incelenmiştir (Şekil 6).  $P_{çık}$  vektörünün standart sapmasının en küçük olduğu değer, tesis üretimlerinin optimum karışım oranını (en kararlı tesis üretimini) göstermektedir. Yapılan incelemeler sonucunda  $P_{çık}$  vektöründeki standart sapmanın minimum olduğu  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri sırasıyla 0,30 ve 0,80 olarak bulunmuştur. Elde edilen  $\alpha$  ve  $\beta$  değerlerini  $P_{çık}$  denklemine yerleştirdiğimizde Kahramanmaraş bölgesinde kurulacak optimum HES, GES ve RES oranları sırasıyla %14, %56 ve %30 olarak elde edilmiştir. Bölgede bu oranlara sahip HES, GES ve RES kurulması sonucunda elde edilecek üretim grafiği Şekil 7’de verilmiştir. Grafikteki optimum enerji karışım değerlerinin standart sapması 0,1132 olarak bulunmuştur. Elde edilen optimum enerji karışımının, tüm tesis üretimlerine göre daha kararlı olduğu görülmektedir. Bu durum; farklı bölgelerde kurulabilecek YEK tesisleri arasında optimum enerji karışım oranı belirlenerek, YEK üretimlerinin geleneksel şebeke sistemleri üzerindeki bozucu etkisinin azaltılabileceğini göstermektedir.

#### 4. KAYNAKÇA

1. Şahin, C., Karaçor, M., Özbay, H., 2019. Yenilenebilir Enerji Kaynağı Kurulum Gücü Minimize Katsayısının Belirlenmesi, Eur. J. Sci. Technol., 15, 404-411.
2. Gençoğlu, M.T., 2002. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Açısından Önemi,” Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilim. Derg., 14(2), 57-64.
3. Kayapınar Kaya, S., Dal, M., Aşkın, A., 2019. Türkiye’deki Devlet ve Vakıf Üniversite Kampüslerinin Sürdürülebilir-ekolojik Parametreleri Açısından Karşılaştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg., 21(1), 1–20.
4. Yıldırım, O., Nuri, F.İ., 2018. Yenilenebilir Enerji ve Sürdürülebilir Kalkınma İlişkisi, J. International Banking Econ. Manag. Studies, 1, (1), 105-143.
5. Karadöl, İ., Keçecioğlu, Ö.F., Açıkgöz, H., Şekkeli, M., 2017. Kahramanmaraş Bölgesi için Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Hibrit Sisteminin İncelenmesi, 20(2), 89-96.
6. Thomaidis, N.S., Santos-Alamillos, F.J., Pozo-Vázquez, D., Usaola-García, J., 2016. Optimal Management of Wind and Solar Energy Resources, Comput. Oper. Res., 66, 284-291.
7. Kılınç, F.Ç., 2015. Güneş Enerjisi, Türkiye’deki Son Durumu ve Üretim Teknolojileri, Mühendis ve Makina, 56(671), 28.
8. Wu, Y.K., Tsai, S.H., Zou, M.Y., 2013. Accommodating High PV Penetration on the Distribution System of Kinmen Island, Energy Power Eng., 05(04), 209-214.
9. Eftekharijad, S., Heydt, G.T., Vittal, V., 2015. Optimal Generation Dispatch with High Penetration of Photovoltaic Generation, IEEE Trans. Sustain. Energy, 6(3), 1013-1020.
10. Vong, N.M., Pillay, S., Lo, V., 2018. Effect of Solar PV on Frequency Management in New Zealand, 2017 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia Smart Grid Smart Community, 1-6.
11. Demiroğulları, M., Demiroğulları, T.N., 2015. Occuring Simulation Model of Grid Connection, Gazi Mühendislik Bilim. Derg., 1(3), 351-368.
12. Wang, Y., Silva, V., Lopez-Botet-Zulueta, M., 2015. Impact of High Penetration of Variable Renewable Generation on Frequency Dynamics in the Continental Europe Interconnected System, IET Renew. Power Gener., 10(1), 10-16.
13. Dos Anjos, P.S., Alves Da Silva, A.S., Stošić, B., Stošić, T., 2015. Long-term Correlations and Cross-correlations in Wind Speed and Solar Radiation Temporal Series from Fernando de Noronha Island, Brazil, Phys. A Stat. Mech. its Appl., 424, 90-96.
14. Cantão, M.P., Bessa, M.R., Bettiga, R.D., Detzel, H.M., Lima, J.M., 2017. Evaluation of Hydro-wind Complementarity in the Brazilian Territory by Means of Correlation Maps, Renew. Energy, 101, 1215-1225.
15. Karadöl, İ., Yıldız, C., Keçecioğlu, Ö.F., Şekkeli, M., 2018. Kararsız HES ve GES Üretimlerinin Düzenlenmesi için Optimal Enerji Karışımı Tespiti : Malatya İli Örneği Optimal, Gazi Mühendislik Bilim. Derg., 4(2), 84-90.

16. Schmidt, J., Cancelli, R., Pereira, A.O., 2016. An Optimal Mix of Solar PV, Wind and Hydro Power for a Low-carbon Electricity Supply in Brazil, *Renew. Energy*, 85, 137-147.
17. Tekin, M., Keçecioglu, Ö.F., Erafşar, Ö., Şekkeli, M., 2016. Bir Hidroelektrik Santralin (HES) Elektrik Şebekesindeki Harmonik Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi, *KSU Mühendislik Bilim. Derg.*, 19(2), 70-77.
18. Emir, A., Bozkuş, Z., Yanmaz, A.M., 2014. Nehir Tipi Hidroelektrik Santrallerin Bilgisayar Destekli Ön Tasarımı, *İMO Tek. Dergi*, 6925-6942.
19. Yıldız, C., Şekkeli, M., 2016. Optimal Bidding in Turkey Day Ahead Electricity Market for Wind Energy and Pumped Storage Hydro Power Plant, *Pamukkale Univ. Muh. Bilim Derg*, 22(5), 361-366.
20. Malkawi, S., Al-Nimr, M., Azizi, D., 2017. A Multi-criteria Optimization Analysis for Jordan's Energy Mix, *Energy*, 127(13), 680-696.
21. Hong, S., Bradshaw, C.J.A., Brook, B.W., 2013. Evaluating Options for the Future Energy Mix of Japan After the Fukushima Nuclear Crisis, *Energy Policy*, 56, 418-424.
22. Aslantürk, O., Kırprızlı, G., 2020. The Role of Renewable Energy in Ensuring Energy Security of Supply and Reducing Energy-related Import, *Int. J. Energy Econ. Policy*, 10(2), 354-359.
23. Viviescas, C., Lima, L., Diuana, F.A., Vasquez, E., Ludovique, C., Silva, G.N., Huback, V., Magalar, L., Szklo, A., Lucena André F.P., Schaeffer, R., 2019. Contribution of Variable Renewable Energy to Increase Energy Security in Latin America: Complementarity and Climate Change Impacts on Wind and Solar Resources, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 113, 1-1.
24. Kandasamy, C.P., Prabu, P., Niruba, K., 2013. Solar Potential Assessment Using PVSYS Software, 2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE), Chennai, 2013, 667-672
25. Prasad, A.A., Taylor, R.A., Kay, M., 2017. Assessment of Solar and Wind Resource Synergy in Australia, *Appl. Energy*, 190, 354-367.
26. Oktik, Ş., 2015. Fotovoltaik Sektörü Değer Zinciri Türkiye için Fırsatlar ve Tehditler Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstri Derneği, 6. Türkiye Enerj. Zirvesi, 84, 12-13.
27. François, B., Borga, M., Creutin, J.D., Hingray, B., Raynaud, D., Sauterleute, J.F., 2016. Complementarity Between Solar and Hydro Power: Sensitivity Study to Climate Characteristics in Northern-Italy, *Renew. Energy*, 86, 543-553.
28. Albostan, A., Çekiç, Y., Eren, L., 2013. Rüzgar Enerjisinin Türkiye'nin Enerji Arz Güvenliğine Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, 24(4), 641-649.
29. TEİAŞ 2018, Türkiye'de Elektrik Enerjisi Kurulu Gücü, 1-14.
30. De Oliveira Costa Souza Rosa, C., Costa, K.A., Da Silva Christo, E., Bertahone, P.B., 2017. Complementarity of Hydro, Photovoltaic and Wind Power in Rio de Janeiro State, *Sustain.*, 9(7), 1-12.
31. Liu, G., Zhou, J., Jia, B., He, F., Yang, Y., Sun N., 2019. Advance Short-term Wind Energy Quality Assessment Based on Instantaneous Standard Deviation and Variogram of Wind Speed by a Hybrid Method, *Appl. Energy*, 238, 643-667.
32. Widén, J., 2011. Correlations Between Large-scale Solar and Wind Power in a Future Scenario for Sweden, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 2(2), 177-184.

## Yumurtalık Fayı'nın Holosen Aktivitesinin Araştırılması (Ceyhan-Adana)

Meryem KARA<sup>\*1</sup>, Ulvi Can ÜNLÜGENÇ<sup>2</sup>, Hasan ELMACI<sup>3</sup>, Tamer Y. DUMAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Doğu Akdeniz Bölge Müdürlüğü, Adana

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

<sup>3</sup>Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara

<sup>4</sup>Fugro-Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd. Şti., Ankara

Geliş tarihi: 24.12.2019

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Bu çalışmada, İskenderun Körfezi'ni kuzeyden sınırlayan Yumurtalık Fayı'nın deprem aktivitesi araştırılmıştır. Yumurtalık Fayı'nın deprem üretme potansiyelinin belirlenmesi, etkili olduğu alanlarda tarım, sanayi ve yerleşimin yoğun olması nedeniyle çok önemlidir. Ayrıca Doğu Anadolu Fayı (DAF)'nın Akdeniz'e uzandığı güneybatı kesimini oluşturmasından dolayı DAF'ın depremselliğinin belirlenmesine de önemli katkılar sağlayacaktır. Çalışma kapsamında paleosismolojik hendek kazıları gerçekleştirilmiş ve hendeklerden elde edilen veriler ile fay üzerinde meydana gelmiş ve yüzey yırtılması ile sonuçlanmış en az üç adet deprem tespit edilmiştir. Aletsel dönem deprem kayıtları incelendiğinde, Yumurtalık Fayı ve çevresinde büyüklüğü  $M=4$  ve üzerinde birçok depremin meydana geldiği görülmektedir. Fayın uzunluğu ve karakteri gibi fay parametreleri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda Yumurtalık Fayı üzerinde meydana gelebilecek en büyük depremin büyüklüğünün 6,9 olması beklenmektedir. Sonuç olarak Yumurtalık Fayı'nın Holosen aktivitesi net olarak ortaya konulmuş ve çalışılan bölgenin neotektonik süreçlerini karşılayan bir mekanizmada çalıştığı görülmüştür.

Bu çalışma, Yumurtalık Fayı'nın geçtiği alanlardaki deprem tehlikesinin değerlendirilmesine yönelik çalışmalara önemli katkılar sağlayacak niteliktedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yumurtalık fayı, Paleosismoloji, Depremsellik, Aktif tektonik

### Investigation of Holocene Activity of the Yumurtalık Fault (Ceyhan-Adana)

#### Abstract

In this study, seismic activity of the Yumurtalık Fault, passes through the north of the İskenderun Bay was investigated. The determination of the Yumurtalık Fault's earthquake potential is essential because the region is very important in terms of industry, agriculture and settlement. And also, it has made significant contributions to determine the seismicity of the Eastern Anatolian Fault (EAF) since it forms the southwestern part of the EAF. Paleoseismic trenches were excavated on the Yumurtalık Fault and data obtained from the trenches revealed at least three earthquakes resulting in surface rupture on the fault. When the seismic records of the earthquake are examined, several earthquakes of  $M = 4$  and above are reported. Using fault parameters such as length and fault character, it is expected that the greatest

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Meryem KARA, [meryem.kara@mta.gov.tr](mailto:meryem.kara@mta.gov.tr)

earthquake can occur on the Yumurtalık Fault is 6.9. The Holocene activity of the Yumurtalık Fault is clearly defined and it has been observed that it works in a mechanism meeting the neotectonic processes of the region.

This study will contribute to the evaluation of the earthquake hazard in the areas where the Yumurtalık Fault crosses.

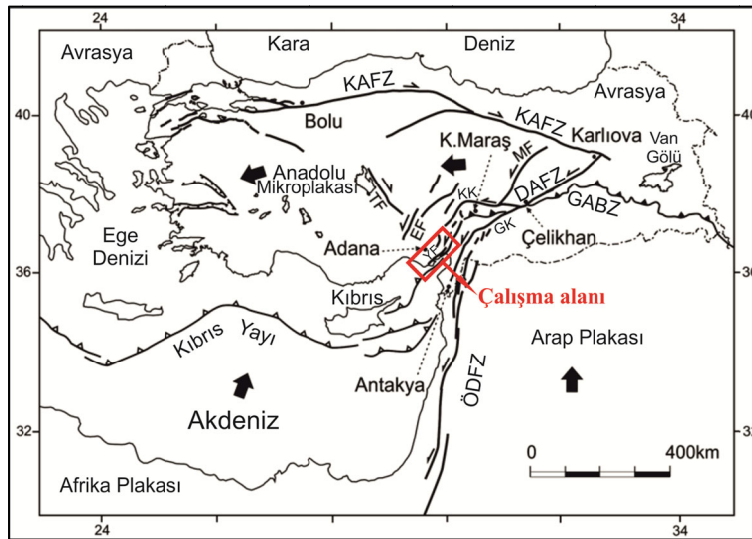
**Keywords:** Yumurtalık Fault, Paleoseismology, Seismicity, Active tectonic

## 1. GİRİŞ

Ülkemiz tektonik olarak aktif bir bölgede yer almakta olup bu nedenle jeolojik kökenli doğal afetlerin başında gelen deprem, Türkiye'de sıklıkla yaşanmaktadır. Depremlerin mekansal ve zamansal olarak tahmin edilebilirliği deprem kaynaklı can ve mal kayıplarını azaltabilmek açısından son derece önemlidir. Bugünkü teknoloji ile depremlerin oluşum yeri ve zamanı kesin olarak belirlenemese de jeomorfolojik ve paleosismolojik çalışmalar ile bölgede yer alan fayların deprem potansiyelleri araştırılarak sismik tehlike analizleri yapılabilmektedir.

Bir fayın deprem potansiyelinin anlaşılmasında fayın niteliği ve uzunluğu gibi geometrik özelliklerinin yanı sıra fay üzerinde meydana gelmiş depremlerin tekrarlanma aralığı ve fayın kayma hızı da önemli parametrelerdendir. Bu parametrelerin elde edilebilmesi için fay üzerinde meydana gelmiş olan depremlerin izlerinin tanımlanabilmesi gerekmektedir. Paleosismolojik çalışmalar fayın sismik potansiyelinin çok geniş bir zaman aralığında incelenmesine olanak sağlaması açısından önemlidir.

Bu çalışmada, Yumurtalık Fayı'nın deprem üretme potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma alanı, Yumurtalık Fayı'nın geçtiği alan ve yaklaşık 5 km çevresini kapsamaktadır (Şekil 1).



**Şekil 1.** Çalışma alanının (kırmızı kutucuk çalışma alanını göstermektedir); Anadolu-Arap ve Anadolu-Afrika plaka sınırlarında yer alan ana fay sistemleri [3] üzerindeki yeri. Açıklamalar: KAFZ: Kuzey Anadolu Fay Zonu, DAFZ: Doğu Anadolu Fay Zonu, ÖDFZ: Ölü Deniz Fay Zonu, MF: Malatya Fayı, TF: Tuzgölü Fayı EF: Ecemiş Fayı, GABZ: Güneydoğu Anadolu Bindirme Zonu, GK: Doğu Anadolu Fayının Güney Kolu, KK: Doğu Anadolu Fayının Kuzey Kolu ve YF: Yumurtalık Fayı



Yumurtalık Fayı, tektonik konum olarak, Hatay bölgesinde yer alan Antakya üçlü birleşme noktasının hemen kuzeyinde ve Doğu Anadolu Fayı (DAF)'nın Akdeniz'e uzandığı güneybatı kesiminde yer alması bakımından oldukça önemlidir [1-3]. Yumurtalık Fayı'nın güncel aktivitesinin araştırılması ve deprem üretme potansiyeline ilişkin yorum yapılabilmesi; DAF'ın deprem potansiyelinin anlaşılmasına katkı sağlamasının yanı sıra, etkilediği alanların tarım, sanayi ve nüfus açısından önemli bir bölge olmasından dolayı da ayrıca önem arz etmektedir.

## 2. BÖLGESEL JEOLJİ

Amanos Dağları ve Doğu Torosların batı kesimlerinde yer alan çalışma bölgesi, KD-GB uzanımlı iki ana tektonik hat ile ayrılan 3 havzadan oluşmaktadır. Bu havzaların Miyosen öncesi temel birimleri farklı tektonik kuşaklara aittir [5]. Amanos Dağları batısı ve İskenderun Körfezi'nin kuzeyindeki Yumurtalık Fayı'na kadar olan alanın Neojen dönemindeki çökelim alanı İskenderun Havzası'dır. Mersin-Adana-Karaisalı ve Kozan çevresinden Doğu Torosların güneyine kadar olan alan, Adana Neojen As Havzası ve bu iki havza arasında kalan alan ise Misis-Andırın havzası olarak tanımlanmaktadır [5]. Adana Havzasına, Toros Kuşağı birimleri olan Geyikdağı, Aladağ ve Bozkır birlikleri temel oluşturmaktadır [5,6]. İskenderun Neojen Havzasının temel birimleri Arap-Afrika platform istifi, Koçali ofiyolit karmaşığı ve Kızıldağ ofiyolitinden oluşmaktadır [5]. Misis-Andırın Havzasına temel teşkil eden birimler ise kenet kuşağında yer alan ofiyolitik melanj ve Toros kuşağına ait allokonlar olup, bu birimler Pötürge Metamorfileri, Maden ve Ballıkısık karmaşığı, Dokuztekne volkanitleri, Bodrumkale Formasyonu, Yüksekova karmaşığı, Berit meta-ofiyolitleri, Malatya-Keban metamorfileri ve Misis- Andırın karmaşığı olarak tanımlanmaktadır [5]. Misis yapısal yükseliminin gelişim süreci çalışma alanındaki tektono stratigrafinin gelişmesinde etkili olmuş olup, bu yapı bölgenin deprenselliği ve jeolojik geçmişi anlamak açısından önemli bir tektonik uzanım konumundadır [6]. Stratigrafik kanıtlar, Misis yapısal yükselimini oluşturan çökellerin deformasyonunun Erken-Orta Miyosen'de

başladığını ve Pliyosen ve Kuvaterner'de devam ettiğini göstermektedir [8].

Çalışma alanı İskenderun ve Misis-Andırın havzaları arasında yer almaktadır. Misis-Andırın havzası geç Oligosen ve Miyosen yaşlı çökeller üzerine gelen Plio-Kuvaterner yaşlı çökeller ile Adana ve İskenderun havzalarına ait bazaltik lavlardan oluşmaktadır [9]. İki dilimden oluşan Misis-Andırın havzasının KB kanadında Bulgurkaya Olistostromu ve üzerine ilksel ilişkili olarak gelen Alt Miyosen yaşlı Gebenköy Formasyonu yer alırken, GB kanadında yer alan ikinci dilim ise Alt-Orta Miyosen yaşlı Aslantaş ve Karataş formasyonlarının çökelim alanıdır [5]. İnceleme alanında Alt-Orta Miyosen yaşlı Karataş Formasyonu, Üst Miyosen yaşlı Kızıldere Formasyonu, Kuvaterner yaşlı Delihalil Volkanitleri ve alüvyonlar yer almaktadır. En yaşlı birim Alt-Orta Miyosen yaşlı türbiditik özellikli Karataş Formasyonu'dur. Birim çalışma alanında Üst Miyosen yaşlı Kızıldere Formasyonu üzerine tektonik dokanakla gelmektedir. Çalışma alanının doğusunda Kuvaterner yaşlı Delihalil volkanitleri yer almakta olup tüm bu birimler alüvyonlar tarafından aşılal uyumsuzluk ile örtülmektedir.

## 3. BÖLGESEL TEKTONİK

Doğu Anadolu Fayı, Anadolu plakası ile Arap plakasını ayıran sol yanıl yönlü doğrultu atımlı kıta içi transform fayıdır [10,11]. Doğu Anadolu Fayı ile Kuzey Anadolu Fayı arasında kalan Anadolu levhasının batıya doğru rotasyonel hareketi sonucunda, Doğu Anadolu sıkışma bölgesi, Kuzey Anadolu Bölgesi, Orta Anadolu ova bölgesi ve Batı Anadolu genişleme bölgesi oluşmuştur [12]. Yumurtalık Fayı tektonik konum olarak Güneydoğu Anadolu'da, Doğu Anadolu sıkışma bölgesinin en güneybatı kesiminde yer almaktadır [12]. Bu bölgede yer alan tektonik yapılar genellikle sol yanıl doğrultu atımlı faylardan oluşmaktadır [8,9,13,14]. Yumurtalık Fayının aktivitesi, Afrika ve Avrasya plakaları arasında devam eden kuzey-güney yönlü dalma-batma etkisiyle, Anadolu levhasının batıya kaçışı ile ilişkilidir ve doğrultu atımlı bir mekanizmaya sahiptir [4]. Çalışma alanı Tetis'in güney kolunun kapandığı kenet kuşağında yer aldığından dolayı

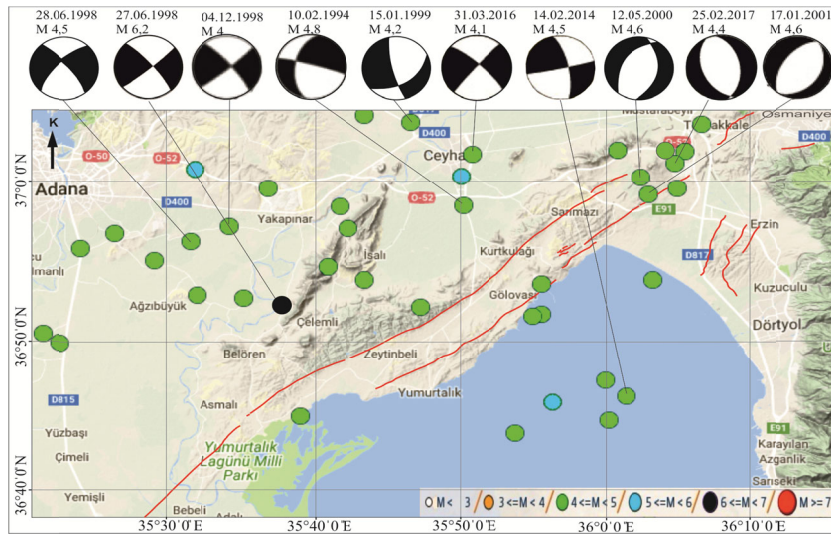


(Şekil 3). Bunlardan en önemlisi Mw: 6.2 büyüklüğündeki 27.06.1998 tarihli Ceyhan-Adana depremidir.

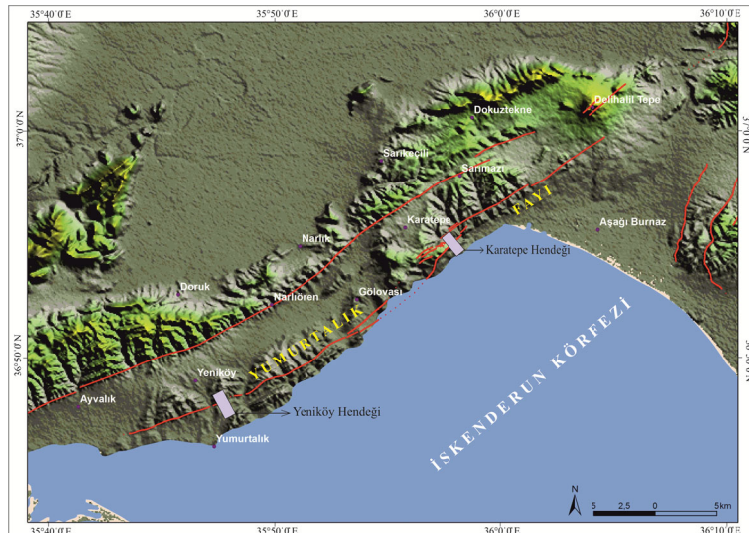
### 5.3. Paleosismolojik Hendek Kazıları

Paleosismoloji tarih öncesinde meydana gelmiş depremlerin yeri, zamanı ve büyüklüğünü araştıran

bir bilim dalıdır [25]. Deprem esnasında yüzeyde meydana gelen deformasyonların belirlenmesi amacıyla kullanılan en yaygın yöntem fay boyunca hendek açma yöntemidir. Bu çalışmada da Yumurtalık Fayı üzerinde iki alanda paleosismolojik hendek kazısı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. İnceleme alanı ve yakın çevresinde aletsel dönemde meydana gelmiş depremlerin dağılım haritası ve odak mekanizma çözümleri (lokasyonlar [21]'den alınarak revize edilmiştir, diri faylar [14]'den, düzlem çözümleri [4, 22-24]'den alınmıştır)

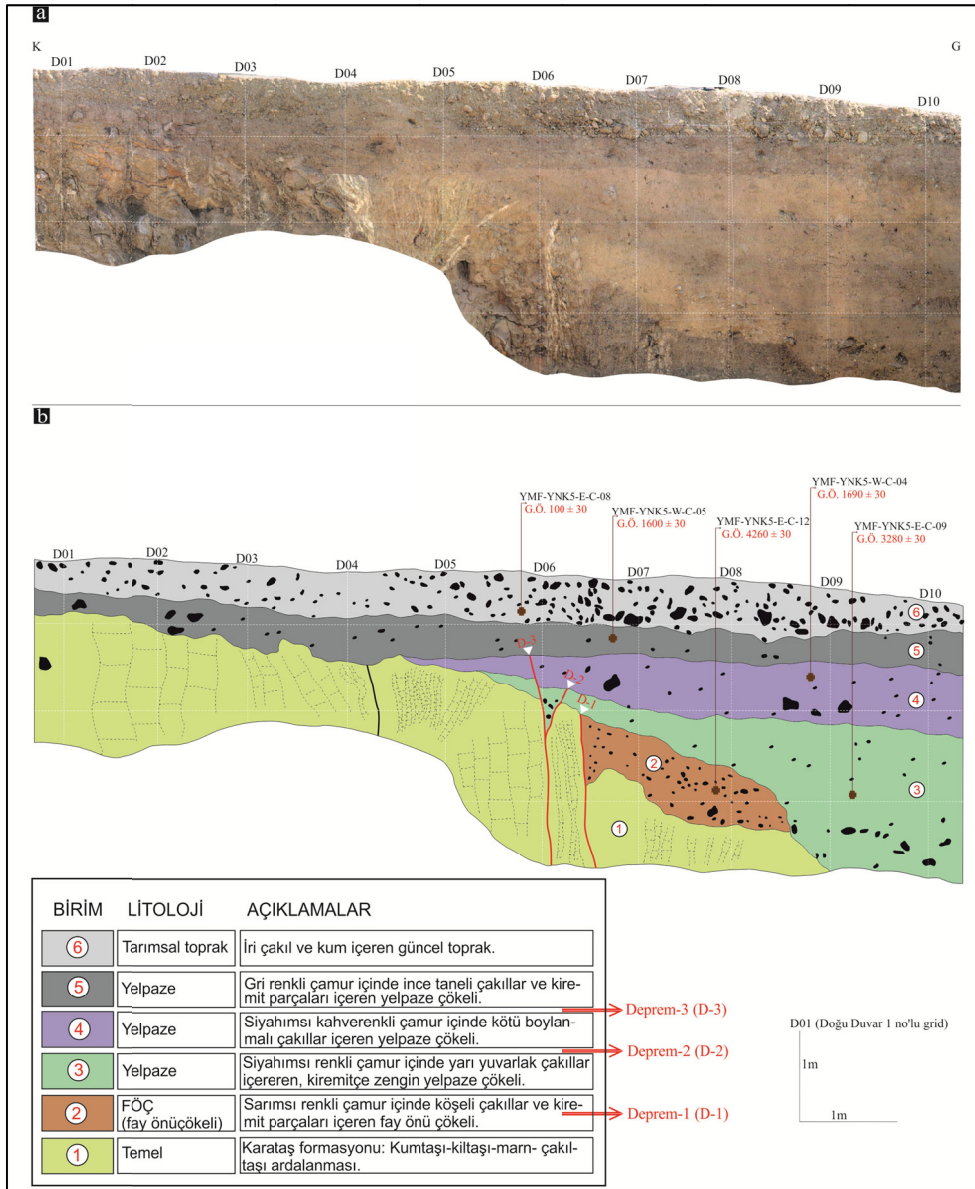


Şekil 4. Yumurtalık Fayı üzerinde açılan hendeklerin lokasyonları (mor kutular hendek lokasyonlarını göstermektedir, diri faylar [14]'den alınmıştır)

### 5.3.1. Yeniköy Hendeği

Yeniköy hendeği Yumurtalık Fayı'nın Karataş formasyonu ile Kızıldere formasyonu arasında dokanak oluşturduğu batı parçası üzerinde açılmıştır. Hendeğin lokasyonu Demirtaş Köyü'nün güney batısında, Yeniköy Mahallesi'nin yaklaşık 2 km güneyinde (GPS: 36S 4076285K/ 749175D)

yer almaktadır (Şekil 4). Hendeğin alanı olarak; kuzeyi yükselmiş olan faylı dokanakta, küçük yelpazelerin ve kolüvyal birikintilerin olabileceği bir alan seçilmiştir. Faya dik bir doğrultuda, yaklaşık 15 m uzunluğunda açılarak 10 metresi loglanan hendeğin genişliği 3,5- 4 metre, derinliği ise 2,5-3 m arasında değişmektedir.



Şekil 5. Yeniköy Hendeği doğu duvarı: a) yorumuz fotoğrafı, b) yorumlanmış hendek logu

Hendek duvarında, en altta Miyosen yaşlı temel birim ve üzerinde gelişen Kuvaterner yelpaze çökelleri olmak üzere toplamda 6 adet çökel paketi ayırtlanmıştır (Şekil 5a,b). Hendek boyunca gözlenen temel birim (1 no'lu birim) ilksel konumunu kaybetmekle beraber tabakalı bir yapı sergilemektedir. Tabanda gözlenen bej renkli, kumtaşı, silttaşı ve kiltası ardalanmasından oluşan türbidit özellikli Karataş Formasyonu (1 no'lu birim) üzerinde, fay zonu önünde, bir deprem esnasında gelişmiş fay önu çökeli (2 no'lu birim) oluşmuştur (Şekil 5). Deprem esnasında güneye eğilinen alanda temel birimden düşen kötü boylanmalı ve köşeli çakıllar içeren 2 no'lu birimden alınan organik sediman örneği ile birimin yaşı GÖ 4260±30 yıl (GÖ: günümüz öncesi), kalibre edilmiş çökelim zamanı ise MÖ 2910-2875 olarak belirlenmiştir. 1 ve 2 no'lu birimleri üzerleyen 3 no'lu birim ise siyahımsı renkli çamur içinde çakıllar içeren, kiremitçe zengin yelpaze çökeldir. 3 no'lu birimden alınan kömürleşmiş malzeme örneğinden yapılan radyokarbon yaş tayini ile birimin yaşı GÖ 3280±30 yıl, kalibre edilmiş çökelim zamanı ise MÖ 1625-1500 olarak belirlenmiştir. Siyahımsı kahverenkli çamur içinde kötü boylanmalı çakıllar içeren 4 no'lu birim, 3 ve 1 no'lu birimi erozyonel olarak üzerlemektedir (Şekil 5). Bu birimden alınan kömürleşmiş malzeme örneğinden GÖ 1690±30 yıl sonucu alınmış ve bu sonucun kalibrasyonu ile en genç çökelleme zaman aralığı MS 255-295 olarak belirlenmiştir. 4 no'lu birimin üzerinde ise gri çamur içinde ince çakıllar ve kiremit parçaları içeren yelpaze çökeli (5 no'lu birim) yer almaktadır (Şekil 5). Bu birimden alınan organik malzeme örneği ile birimin yaşı GÖ 1600±30 yıl, kalibre edilmiş en erken çökelleme zamanı ise MS 395-540 olarak belirlenmiştir. Hendekte tanımlanan en son seviye ise çakıl ve kum içeren güncel toprak (6 no'lu birim) seviyesidir (Şekil 5). Güncel toprak kalınlığı hendekte 25 cm ile 55 cm arasında değişmektedir. Bu seviyeden alınan organik sediman örneği ile birimin çökelim yaşı GÖ 100±30 yıl, kalibre edilmiş en erken çökelleme zamanı ise MS 1680-1735 olarak belirlenmiştir.

Yapısal ve stratigrafik unsurlar birlikte değerlendirildiğinde, hendek duvarlarında gözlenen stratigrafik birimleri kesen faylar

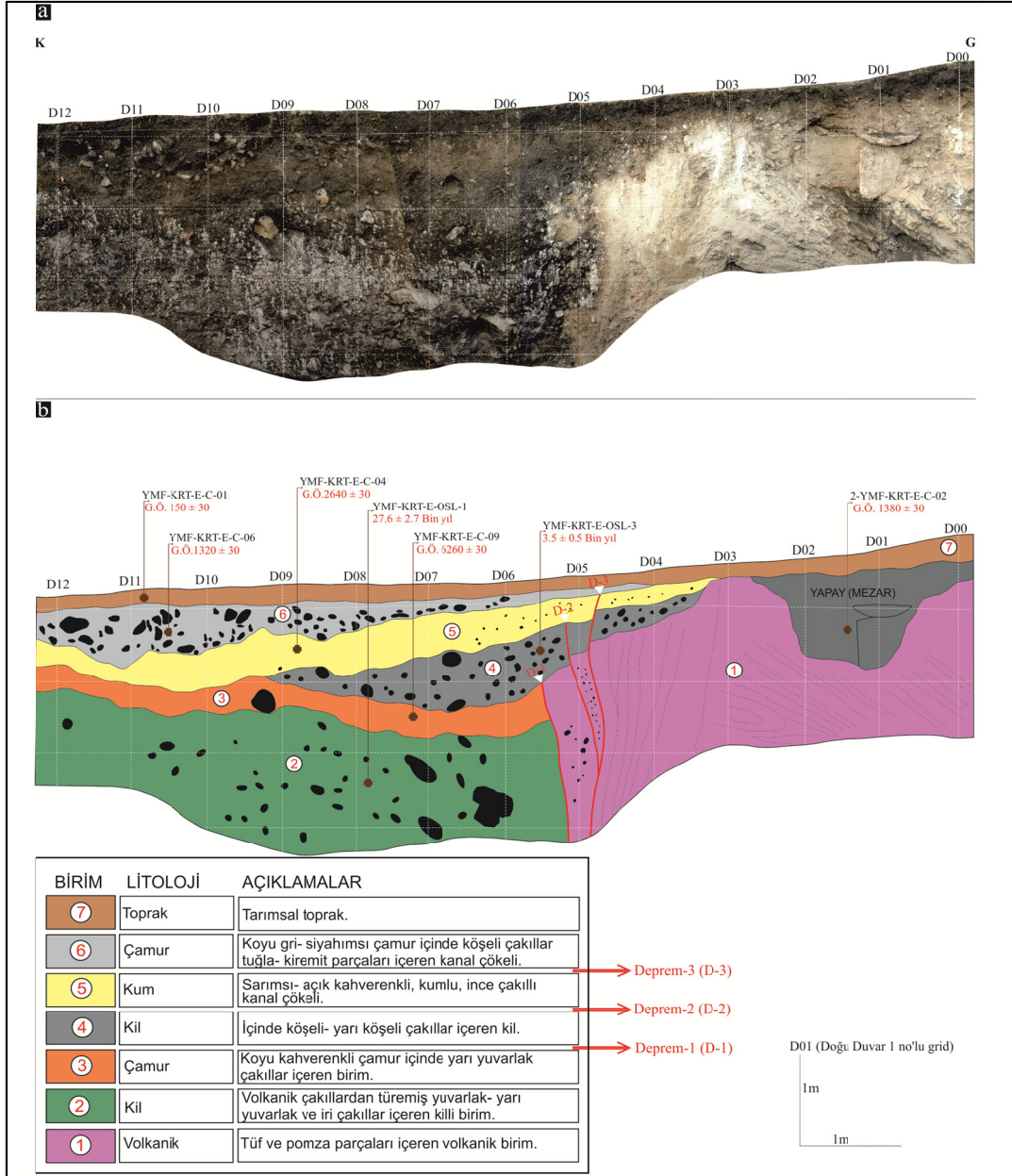
üzerinde meydana gelen depremlerin bir takım deformasyonlara da neden olduğu gözlenmektedir. Yeniköy hendeğinde her iki duvarda da Holosen döneminde yüzey yırtılmasıyla sonuçlanmış 3 adet deprem meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 5a,b). İlk deprem 1 no'lu birimi kesmiş ve köşeli çakıllar ve kiremit parçaları içeren 2 no'lu birim (fay önu çökeli) bu deprem esnasında 1 no'lu birim önünde çöklemiştir. 3 no'lu birimin ise bu depremin meydana geliş zamanından sonra çökeldiği düşünülmektedir. Bu depremin 2 no'lu birimin çökelim zamanında meydana geldiği söylenebilir. İkinci deprem 3 no'lu birimi keserek 4 no'lu birim tarafından üzerlenmektedir. Bu durumda bu depremin 3 no'lu birimin çökeliminden sonra, 4 no'lu birimin çökeliminden önce gerçekleştiği söylenebilir. Kalibre edilmiş C<sup>14</sup> yaşları ile 3 no'lu birimin MÖ 1625-1500 yılları arasında 4 no'lu birimin ise MS 255-295 yılları arasında çökeldiği ve dolayısıyla hendekte tanımlanan 2. depremin MÖ 1625-M.S. 295 yılları arasında meydana geldiği söylenebilir. Hendekte tanımlanan son deprem ise 4 no'lu birimde yüzey yırtılması oluşturarak 5 no'lu birim tarafından örtülmüştür. 5 no'lu birimin çökelim zamanı da MS 395-540 olarak belirlendiğinden dolayı bu depremin meydana gelmiş olabileceği zaman aralığı da MS 255-540 olarak verilebilir.

Depremlerin tekrarlanma periyoduna ilişkin herhangi bir yorum yapılamamasına karşın hendek duvarında izine rastlanılan son depremin MS 255-540 yılları arasında meydana geldiği varsayılarak bu segment üzerinde yaklaşık 1500 yıldır yüzey yırtılmasıyla sonuçlanmış bir deprem oluşmadığı söylenebilir.

### 5.3.2. Karatepe Hendeği

Karatepe hendeği Karatepe Köyü'nün yaklaşık 2,5 km doğusunda (GPS: 36S 4089383K/763866D), Yumurtalık Fayı'nın doğu parçası üzerinde, fayın doğrultusuna dik olarak açılmıştır (Şekil 4). Hendek yeri seçiminde, depremin izlerinin korunmuş olması ve güncel çökellerin bulunduğu bir alan belirlenmesi önemli olduğundan dolayı, Karatepe hendeği de doğrultu atımlı fayların morfolojide bıraktığı izlerden olan çöküntü

alanında (sağ pond) açılmıştır. Hendeğin uzunluğu yaklaşık 12 m, genişliği 3,5-4 m ve derinliği 2,5-3,5 m arasında değişmektedir. Karatepe hendeğinde güncel toprak da dâhil olmak üzere toplamda 7 adet çökel paketi ayırtlanmıştır (Şekil 6a,b).



Şekil 6. Karatepe Hendeği doğu duvarı: a) yorumsız fotomozaiik görüntüsü, b) yorumlanmış hendeğin logu

Hendeğin en tabanında Kuvaterner tuf ve pomza parçaları içeren birim (1) ve bunun önünde volkanik, yuvarlak-yarı yuvarlak çakıllar

içeren killi birim (2) yer almaktadır (Şekil 6). 2 no'lu birimden alınan OSL örneği ile bu birimin yaşı  $27,6 \pm 2,7$  bin yıl olarak belirlenmiştir. 2 no'lu birimin üzerinde yarı yuvarlak volkanik çakıllar içeren siyahımsı renkte çamur (3 no'lu birim) bulunmaktadır (Şekil 6). 3 no'lu birimden alınan organik maddece zengin toprak örneğinin radyokarbon yaş tayini GÖ 6216 $\pm$ 30 sonucunu vermiş ve bu sonucun kalibrasyonu ile birimin en erken MÖ 5210-5310 aralığında çökeldiği belirlenmiştir. 2 ve 3 no'lu birim fay tarafından 1 no'lu birim ile karşı karşıya getirilmiş ve içinde köşeli-yarı köşeli çakıllar bulunan killi birim (4 no'lu birim) ile üzerlenmiştir (Şekil 6). 4 no'lu birimden alınan OSL örneği ile birimin yaşı  $3500 \pm 500$  yıl olarak belirlenmiştir. 4 no'lu birimin de üzerinde sarımsı, açık kahve renkli ince çakıllı ve kumlu (5 no'lu birim) kanal çökeli bulunmaktadır (Şekil 6). 5 no'lu birimden alınan organik sediman örneğinin radyokarbon yaş tayini sonucuna göre birimin yaşı  $2640 \pm 30$ , kalibre edilmiş çökeltme zamanı ise MÖ 830-790 olarak belirlenmiştir. 5 no'lu birim de içinde tuğla ve kiremit parçaları da bulunan, koyu gri siyahımsı çamur olarak tanımlanan 6 no'lu birim tarafından üzerlenmektedir. 6 no'lu birimden alınan kömürleşmiş malzeme örneği ile yapılan radyokarbon yaş tayini birimin yaşını  $1320 \pm 30$  yıl, kalibre edilmiş çökeltme zamanını ise MS 655-720 olarak vermiştir.

Hendeğin en üst seviyesinde ise bütün birimleri üzerleyen, gevşek yapıda, içinde bitki kökleri ve çakılların da bulunduğu tarımsal toprak (7 no'lu birim) yer almaktadır (Şekil 6). En üst seviyeden alınan kömürleşmiş malzeme örneğine göre bu birimin yaşı  $150 \pm 30$  yıl olarak belirlenmiştir. Karatepe hendeğinde her iki duvarda da Holosen döneminde yüzey yırtılması ile sonuçlanmış 3 adet deprem izine rastlanmıştır. Bu depremlerden ilki 2 ve 3 no'lu birimi kesip 4 no'lu birim tarafından örtülmüştür. 3 no'lu birimden alınan numunenin radyometrik yaş analizi sonucunda çökeltme zamanı en erken MÖ 5310-5210 olarak belirlenmiştir. 4 no'lu birimden alınan OSL örneğine göre bu birimin yaşı  $3500 \pm 500$  yıl olarak belirlenmiştir. Buna göre ilk depremin MÖ 5210-5310'dan sonra meydana geldiği söylenebilir.

Hendek duvarında izine rastlanan ikinci depremin 4 no'lu birimi kesip 5 no'lu birim tarafından örtüldüğü görülmektedir. Buna göre bu depreminde 5 no'lu birimin çökeltim zamanı olan MÖ 830-790'dan önce meydana geldiği söylenebilir. Son deprem ise 5 no'lu birimde yüzey yırtılması meydana getirmiş ve 6 no'lu birim tarafından üzerlenmiştir. Bu durumda bu depremin, 5 no'lu birimin en erken çökeltim zamanı ile 6 no'lu birimin en geç çökeltim zamanı olan MÖ 830-MS 720 yılları arasında meydana geldiği söylenebilir.

Hendekte tanımlanan depremlerin tekrarlanma periyoduna ilişkin herhangi bir yorum yapılamamasına karşın hendek duvarında izine rastlanılan son depremin MÖ 830-MS 720 yılları arasında meydana geldiği görülmektedir. Bu durumda bu segment üzerinde yaklaşık 1300 yıldır yüzey yırtılmasıyla sonuçlanmış herhangi bir deprem oluşmadığı söylenebilir.

### 3. SONUÇLAR

Yumurtalık Fayı, Türkiye'nin güneyinde, İskenderun Körfezinin hemen kuzeyinde, kıyıya paralel bir konumda yer almakta ve Doğu Anadolu Fay Sisteminin bir parçasıdır.

Yumurtalık Fayı boyunca gerçekleştirilen jeolojik ve jeomorfolojik arazi gözlemleri sonucunda, fayın doğrultu atım morfolojisini yansıtabilecek şekilde çizgisel uzanım ve morfolojik yapılar (ötelenmiş dereler, topoğrafik sırtlar ve çöküntü alanı vb.) bulunduğu görülmüştür.

Tüm jeolojik, jeomorfolojik ve paleosismolojik çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde Yumurtalık Fayının Holosen aktivitesi net olarak ortaya koyulmuş ve bulunduğu bölgenin Neotektonik süreçlerini karşılayacak şekilde genişlemeli doğrultu atımlı bir mekanizmada çalıştığı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, Yumurtalık Fayı üzerinde açılan her iki hendekte de Holosen döneminde yüzey yırtılmasıyla sonuçlanmış depremlerin izine rastlanmıştır. Açılan hendeklerden elde edilen verilere göre belirlenen depremler arasında

tekrarlanma periyoduna ilişkin yorum yapılamamaktadır. Ancak son depremden bu yana en az 1500 yıl geçtiği söylenebilir.

Altsel dönem deprem kayıtlarına bakıldığında Yumurtalık Fayı üzerinde büyüklüğü  $M=3-4$  arasında birçok depremin meydana geldiği görülmüştür. Tarihsel dönem deprem kayıtları incelendiğinde doğrudan Yumurtalık Fayı ile ilişkilendirilmese de fayın çevresinde birçok depremin meydana geldiği görülmektedir. Hendeklerde izine rastlanan son depremin (MS 255-540) tarihsel dönem kataloglarında yer alan MS 290, MS 517 ve MS 524 depremleri ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

[3] tarafından Yumurtalık fayı için 1mm/yıl kayma oranı hesaplanmıştır. Wells ve Coppersmith tarafından verilen (yüzey kırığı ve oluşturacağı deprem büyüklüğü arasındaki ilişki) bağıntıya göre, doğu ve batı parça olmak üzere iki parçadan oluşan ve toplam uzunluğu 41 km olan Yumurtalık Fayı'nın tek parça olarak kırılması durumunda  $M_w=6,97$  büyüklüğünde bir deprem üretmesi beklenmektedir.

Son depremden bu yana biriken yamulma gerilimi ve  $M_w=6,97$  olası deprem büyüklüğü değerleri, Holosen aktivitesi kesin olarak ortaya konmuş olan Yumurtalık Fayı'nın, geçtiği alanlardaki deprem tehlikesinin değerlendirilmesine yönelik çalışmalara önemli katkılar sağlayacak niteliktedir.

#### 4. TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından yürütülmüş olan "Doğu Anadolu Fayı (DAF) ve Kuzey Anadolu Fayı (KAF)'nın Doğu Kesimlerinde Paleosismolojik Araştırmalar" projesi kapsamında MTA desteği ile gerçekleştirilmiştir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Över, S., Ünlügenç, U. C., 1998. Seismotectonic Evidence of the Antioch Triple Junction and Recent Temporal Change in Quaternary to Present-Day Stress Stage Along

- Hatay Region (SE-Turkey), 3. Uluslararası Türkiye Jeoloji Sempozyumu Bildiri Özleri Kitabı, 98, Ankara.
2. Yürür, M.T., Chorowicz, J., 1998. Recent Volcanism, Tectonics and Plate Kinematics Near The Junction of the African, Arabian and Anatolian Plates in the Eastern Mediterranean, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 85:1-15.
  3. Duman, T.Y., Emre, Ö., 2013. The East Anatolian Fault: Geometry, Segmentation and Jog Characteristics, Geological Society, Special Publication, 372:495-529, London.
  4. Ergin, M., Aktar, M., Eyidoğan, H., 2004. Present-Day Seismicity and Seismotectonics of the Cilician Basin: Eastern Mediterranean Region of Turkey, Seismological Society of America, 94(3):930-939.
  5. Kozlu, H., 1997. Doğu Akdeniz Bölgesi'nde Yeralan Neojen Basenlerinin (İskenderun-Misis Andırın) Tektono-Stratigrafi birimleri ve Bunların Tektonik Gelişimi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-Doktora Tezi, 189, Adana.
  6. Özgül, N., 1976. Torosların Bazı Temel Jeolojik Özellikleri, T.J.K. Bülteni, Ankara, 19(1), 65-78.
  7. Ünlügenç, U.C., Akıncı, A.C., 2017. Kızıldere-Güveloğlu (Ceyhan-Adana) Çivarinin Tektono-Stratigrafisi, Çukurova Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 32(2), 85-99.
  8. Gökçen, S.L., Kelling, G., Gökçen, N., Floyd, P.A., 1988. Sedimentology of a Late Cenozoic Collisional Sequence: the Misis Complex, Adana, Southern Turkey, Sedimentary Geology, 59, 205.
  9. Kelling, G., Gökçen, S.L., Floyd, P.A., Gökçen, N., 1987. Nogene Tectonics and Plate Convergence in the Eastern Mediterranean: New Data from Southern Turkey, Geology, 15, 425-429.
  10. Arpat, E., Şaroğlu, F., 1972. Doğu Anadolu Fayı ile İlgili Bazı Gözlem ve Düşünceler, MTA Bülteni, 73, 1-9.
  11. Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., 1992b. The East Anatolian Fault Zone of Turkey, Annales Tectonicae, 6, 99-125.
  12. Şengör, A.M.C., Görür, N., Şaroğlu, F., 1985. Strike-Slip Faulting and Related Basin



- Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study (K.T. Biddle&N. Christie ed.), In: Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation, *Blick. Soc. Econ. Paleont. and Min., Spec. Publ.*, 37, 227–264.
13. Williams, G.D., Ünlügenç, U.C., Kelling, G., Demirkol, C., 1995. Tectonic Controls on Stratigraphic Evolution of the Adana Basin, Turkey, *Journal of the Geological Society, London*, 152, 873-882.
  14. Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., Şaroğlu, F., 2013. Açıklamalı Türkiye Dirli Fay Haritası, MTA Genel Müdürlüğü, Özel Yayın Serisi-30, Ankara.
  15. Özden, S., Över, S., Ünlügenç, U.C., 2001. Recent Change i Stress Regime Arunda Nksar Basin, Eastern Part of the Central North Anatolian Fault Zone, Turkey, 4. Uluslararası Türkiye Jeoloji Sempozyumu Bildiri Özleri Kitabı, 194, Adana.
  16. Över, S., Özden, S., Ünlügenç, U.C., 2004. Late Cenozoic Stress Distribution along the Misis Range in the Anatolian, Arabian, and African Plate Intersection Region, SE Turkey, *Tectonics*, 23(TC3008):1-19.
  17. Duman, T.Y, Robertson, A.F.H., Elmacı, H., Kara, M., 2017. Palaeozoic-Recent Geological Development and Uplift of the Amanos Mountains (S Turkey) in the Critically Located Northwestern Most Corner of the Arabian Continent, *Geodinamica Acta*, 29(1), 103-138.
  18. Aksu, A.E., Calon, T.J., Piper, D.J.W., Turgut, S., İzdar, E., 1992a. Architecture of Late Orogenic Quaternary Basins in Northeastern Mediterranean Sea, *Tectonophysics*, 210, 191-213.
  19. Allen, C.R., 1986. Seismological and Paleoseismological Techniques of Research in Active Tectonics. (R.E. Wallace Chairman Ed.) in *Active Tectonics: Studies in Geophysics*, National Academy Press, 148-154, Washington DC.
  20. Soysal, H., Sipahioğlu, S., Kolçak, D., Altınok, Y., 1981. Türkiye ve Çevresinin Tarihsel Deprem Kataloğu (MÖ 2100-MS 1900), TÜBİTAK, Proje no: TBAG341, yayın no: 563, TBAG seri no: 34, Ankara.
  21. AFAD, T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı, İnternet Sitesi, <https://deprem.afad.gov.tr/depremkatalogu>.
  22. Tan, O., Tapırdamaz, M. C., Yörük, A., 2008. The Earthquake Catalogues for Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17, 405-418.
  23. Yönlü, 2012. Doğu Anadolu Fay Zonu'nun Gölbaşı (Adıyaman) ile Karataş (Adana) Arasındaki Kesiminin Geç Kuvaterner Aktivitesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 439.
  24. EMSC, The European-Mediterranean Seismological Centre İnternet Sitesi, <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/seismologist.php>.
  25. McCalpin, J., 1996. Paleoseismology Academic Press, San Diego, 613.
  26. Wells, D., Coppersmith, K., 1994. New Emprical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement. *Bull. Seism. Soc. of America*, 84(4), 974-1002.



## Ağ Elemanı Özelliklerinin Sayısal Model Sonuçları Üzerine Etkisinin Belirlenmesi

Oğuz ŞİMŞEK<sup>\*1</sup>, Hüseyin İŞLEK<sup>1</sup>, M. Sami AKÖZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 24.03.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Gelişen teknolojiyle birlikte bilgisayar yazılımları, karmaşık mühendislik problemlerin çözümünde oldukça sık kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan bu yazılımlardan elde edilen sonuçların doğruluğunun test edilmesi için fiziksel model deneyleri yapılmakta ve elde edilen sonuçlar, sayısal model sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Sayısal model sonuçları üzerinde, ağ yapısı özellikleri, kullanılan türbülans modeli, iterasyon sayısı ve adımı büyüklüğü gibi parametrelerin etkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, eğrisel geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın sayısal modellemesinde farklı geometrik özelliklere sahip çözüm ağları tasarlanmıştır. Akımı idare eden temel denklemlerin çözümü, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Sayısal hesaplamalarda, Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) denklemlerine dayalı çözüm yapan Renormalization Group k-ε (RNG) türbülans modeli ve su-hava arakesitinin belirlenmesinde ise Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Sayısal olarak elde edilen su yüzü ve hız profilleri, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak optimum çözüm ağının tipi ve boyutu belirlenmiştir. Ayrıca, hız profilleri üzerinde duvar yakını fonksiyonlarının etkileri araştırılmıştır. Deneysel ve farklı ağ yapıları kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin karşılaştırılmasından, çok küçük elemanlardan oluşan hesaplama ağı yapısının sayısal model sonuçları üzerinde önemli ölçüde iyileştirme yapmadığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan hacimleri yöntemi, Ağ eleman boyutu, Duvar yakını fonksiyonu, Sayısal modelleme

### Determining the Effect of Computational Grid Properties on Numerical Model Results

#### Abstract

With the developing technology, computer software has started to be used frequently in solving complex engineering problems. Physical model experiments are carried out to test the accuracy of these software

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Oğuz ŞİMŞEK, [oguzsimsek@harran.edu.tr](mailto:oguzsimsek@harran.edu.tr)

and the results are compared with the numerical model results. It is known that the properties of the grid structure, the turbulence model, the number of iterations and the step size have effects on the numerical model results. In the numerical modeling of the flow passing over the curvilinear broad-crested weir, solution grids with different geometrical features are designed. The basic equations are solved by ANSYS-Fluent package program based on finite volume method. In numerical calculations, the Renormalization Group  $k-\epsilon$  (RNG) turbulence model based on Reynolds Average Navier Stokes (RANS) equations and Volumes of Fluid (VOF) Method was used to determine the water-air intersection. The optimum solution grid type and size were determined by comparing the obtained numerical model results with the experimental results. In addition, numerical modeling has been done with different near wall treatment functions. It has been determined from the comparison of numerical velocity profiles obtained by using experimental and different grid structures, creating a very tight grid structure did not significantly improve the numerical model results.

**Keywords:** Volume of fluid (VOF), Grid size, Near wall function, Numerical model

## 1. GİRİŞ

Savaklar, açık kanallarda ve akarsularda akımı düzenlemek ve debiyi ölçmek üzere yaygın olarak kullanılan hidrolik yapılardır. Savaklar, akarsu veya açık kanal en kesitini tamamen kapatmakta ve akıma dik doğrultuda inşa edilmektedir. Savağın akım alanına inşa edilmesiyle birlikte, akım rejiminde değişiklik meydana gelmekte, savak membasında kritik altı-nehir rejimi ( $Fr < 1$ ), savak kretinde kritik ( $Fr = 1$ ), savak mansabında ise kritik üstü-sel rejimi ( $Fr > 1$ ) akım koşulları oluşmaktadır.

Savaklar trapez, dikdörtgen, üçgen ve eğrisel geniş başlıklı olmak üzere farklı tiplerde inşa edilebilmektedir. Savak geometrisinin akım çizgilerine uyarlanmasıyla, akımda meydana gelen enerji kayıpları azalmaktadır. Araştırmalar, farklı geometrik özelliklere sahip savakların hidrolik ve geometrik özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak devam etmektedir. Hidrolik açıdan daha elverişli savak geometrilerinin belirlenmesi için fiziksel model deneyleri laboratuvar ortamında yapılabilmektedir. Bu deneylerde, ölçek etkilerinden kaynaklanan hataların yanında, ölçümü yapan kişilerin ölçüm hassasiyetinden kaynaklanan hatalar da söz konusu olmaktadır. Bunun yanında, bilgisayar teknolojisinde meydana gelen gelişmeler, birçok mühendislik alanında karmaşık problemlerin çözümünü mümkün hale getirmiştir. Bu gelişen teknolojiyle birlikte,

hidrolik mühendisliği açısından da su-yapı etkileşiminin bulunduğu karmaşık akım problemlerinin çözümü, bilgisayar ortamında kolayca yapılmaktadır. Ayrıca, bilgisayar ortamında yapılan sayısal modellemeler, fiziksel modelin aksine, ek ölçüm cihazları kullanmadan akım ile ilgili istenilen birçok özelliği elde etme imkânı sunmaktadır. Bunun yanında, fiziksel model çalışmalarına kıyasla sayısal model deneyleri, zaman ve maddi açıdan daha ekonomik olmasının yanında insan gücü ihtiyacını azaltmakta ve hata oranı fiziksel model deneylerine kıyasla küçük olmaktadır. Fakat, sayısal model sonuçlarının güvenilirliğinin test edilmesi için de fiziksel model çalışmaları ile doğrulanmasına ihtiyaç vardır. Çünkü, sayısal model sonuçları üzerinde, temel denklemlerin çözümü için kullanılan hesaplama yöntemi, hesaplama ağının tasarımı, seçilen türbülans modeli, duvar yakını modeli, iterasyon sayısı, iterasyon adımının büyüklüğü ve çözüm süresi gibi birçok parametre etkilidir. Farklı araştırmacılar tarafından, açık kanal akımları ve yapılarla etkileşim halinde bulunan akımların sayısal modellemesi yapılmıştır [1-5]. Farklı çalışmalarda, farklı savak modellerinin sayısal olarak modellenmesinde farklı türbülans modellerinin başarılı olduğu belirtilmiştir. Birçok araştırmacı, ağ yapısından bağımsız sayısal çözümler elde etmek amacıyla Ağ Yakınsama indeksi yöntemini ve su-hava arakesitinin belirlenmesi için ise akışkan hacimleri yöntemini kullanmıştır. Ağ yakınsama yöntemi, en

az 3 farklı çözüm ağı tasarımını zorunlu kılmakta ve akışkan hacimleri yöntemi ise akım profilinin belirlenmesinde oldukça başarılı sonuçlar vermektedir [6-10]. Her ne kadar ağ yapısının sonuçlar üzerindeki etkisi ağ yakınsama indeksi yöntemi ile test ediliyor olsa da çok farklı yoğunluğa sahip olmayan hesaplama ağlarının ağ yakınsama indeksinde kriteri sağladığı görülmektedir. Bu yöntemde, başlangıç ağ yapısının belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Son yıllarda fiziksel modellerin maliyetlerini azaltmak için yapılan sayısal modellemelerde özellikle bilgisayar gücünün kullanımını ve donanım ihtiyacını ciddi anlamda arttıran ağ yapısının en kadar küçük ağ elemanlarından oluşacağı belirlenmesi önemli bir konudur. Bu çalışmayla, hesaplama ağının herhangi bir indeks kullanmadan uygunluğunun belirlenmesi ve çok ince elemanlardan oluşan hesaplama ağlarının sayısal sonuçlar üzerindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada, eğrisel geniş başlıklı savak ile etkileşim halindeki açık kanal akımının hız alanı ve su yüzü profili, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent programı kullanılarak sayısal olarak elde edilmiştir. Akımın hareketini idare eden süreklilik ve momentum denklemleri, Renormalization Group (RNG) türbülans modeliyle, farklı geometrik özelliklere sahip çözüm ağları ve farklı duvar fonksiyonları kullanılarak çözülmüştür. Su-hava arakesitinin belirlenmesinde akışkan hacimleri yönteminden yararlanılmıştır. Farklı geometrik özelliklere sahip çözüm ağları ve duvar yakını modellemesi kullanılarak elde edilen sayısal hız ve su yüzü profilleri, Şimşek ve arkadaşları [11] tarafından elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Deneysel

Deneysel, Şimşek ve arkadaşları [11] tarafından Şekil 1'de şematik olarak verilen açık kanal modelinde yapılmıştır. Açık kanal modelinin genişliği, yüksekliği ve uzunluğu sırasıyla 20 cm,

20 cm ve 240 cm'dir. Açık kanalın yan duvarları ve tabanı cam malzemeden yapılmış ve kanalın tüm yüzeyleri hidrolik açıdan cilalıdır. Taban genişliği 70 cm, kret yüksekliği 6,8 cm olan eğrisel geniş başlıklı savak, kanal başlangıcından 70 cm uzağa yerleştirilmiştir.

Deneysel su yüzü profili limnometreyle,  $x$  doğrultusundaki hız bileşeni ( $u$ ) tek boyutlu Laser Doppler Anemometry (LDA) kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel ölçümlerde akım debisi  $Q=0,00824 \text{ m}^3/\text{s}$ , memba bölgesindeki su derinliği  $h_0=0,146 \text{ m}$ , kesit ortalama hızı  $V_0=0,288 \text{ m/s}$ , Froude sayısı  $Fr_0=0,2407$  ve Reynolds sayısı  $Re_0=24.000$ 'dir [11]. Sayısal modellemeler, deneysel aynı koşullara sahip açık kanal akımı için gerçekleştirilmiştir.

### 2.2. Sayısal Modelleme

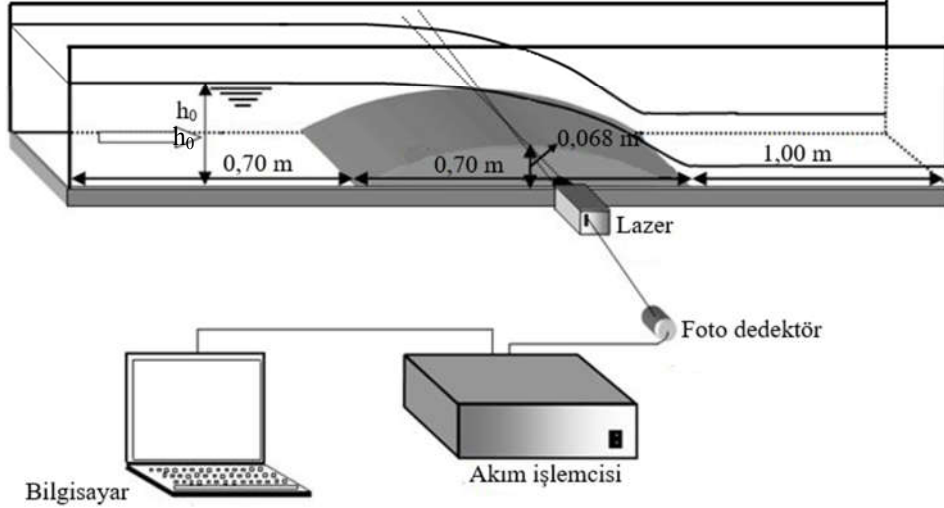
#### 2.2.1. Temel Denklemler ve Türbülans Modeli

Eğrisel geniş başlıklı savakla etkileşimde bulunan açık akımının hareketini idare eden temel denklemler kütle ve momentumun korunumu (Reynolds-ortalama Navier-Stokes) denklemleri, indis notasyonunda sırasıyla aşağıdaki gibidir (Eşitlik 1-2):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2'de  $u_i$ ,  $x_i$  doğrultusundaki hız bileşeni,  $g$  yer çekimi ivmesi,  $p$  basınç,  $\mu$  dinamik viskozite,  $\rho$  akışkan yoğunluğu ve  $\tau_{ij}$  türbülans (Reynolds) gerilmeleridir. Bu çalışmaya konu olan üç boyutlu akımı idare eden yukarıdaki 4 adet denklem 10 adet bilinmeyen içermektedir, bunlar: üç hız bileşeni  $\bar{u}_i$ , basınç  $\bar{p}$  ve 6 bağımsız Reynolds gerilmesidir ( $\overline{\rho u_i u_j}$ ). Böylece, denklem takımının çözülebilmesi için türbülans gerilmelerinin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. İki boyutlu akımda ise bu bilinmeyen sayısı 6'ya düşmektedir.



Şekil 1. Deneysel düzeneği ve LDA hız ölçüm sistemi [11]

Bu sorun, yukarıdaki zamansal-ortalama eşitliklerinin sayısal çözümü sürecinde, eşitliklerde yer alan türbülans gerilmelerinin uygun türbülans kapatma modelleriyle tanımlanmasını zorunlu kılmaktadır. Türbülans viskozitesinin doğrusal olarak ifade edilmesini esas alan Boussinesq yaklaşımına göre Eşitlik 2’deki türbülans kayma gerilmeleri bünye denklemi ile, sıkışmayan akımlar için aşağıdaki gibi verilmiştir (Eşitlik 3):

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

burada  $u_i'$  ve  $u_j'$  yatay ve düşey türbülans hız sapınçları,  $\mu_t$  türbülans viskozitesi,  $k$  ( $=\overline{u_i' u_i'}/2$ ) türbülans kinetik enerjisi ve  $\delta_{ij}$  Kronecker deltadır.

Şimşek ve arkadaşları [11] çalışmalarında, Eşitlik 3’te görülen  $\mu_t$  türbülans viskozitesinin hesaplanmasında Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerinin (RANS) çözümüne dayalı farklı türbülans modelleri kullanmış ve farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sayısal model sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır. Ortalama Karesel Hata kriterine göre yapılan karşılaştırma sonucunda RNG [12] türbülans modelinin çalışmada kullanılan diğer türbülans modellerine kıyasla, hız alanını ve su

yüzü profilini belirlemede daha başarılı olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, eğrisel geniş başlıklı savak üzerinden geçen akımın sayısal modellenmesinde farklı türbülans modellerinin değerlendirilmesinden ziyade, sayısal model sonuçları üzerinde etkili olduğu bilinen hesaplama ağı tasarımı detaylı olarak irdelenmiştir.

### 2.2.2. Akışkan Hacimleri Yöntemi

Sayısal modellemede su yüzü profillerinin belirlenmesi için Akışkan Hacimleri Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, sayısal modellemede kullanılan hesaplama ağının her bir hücresinin su ile tamamen dolu, kısmen su ile dolu veya tamamen boş (tamamen hava ile dolu) olduğunu belirlemektedir. Hacimsel doluluk oranını temsilen bir akışkan hacmi (F) tanımlanır. Eşitlik 4’te F’nin taşınım denklemi görülmektedir. F=1 için ağ elemanı tamamen su ile dolu, F=0 için tamamen boş (hava ile dolu) ve  $0 < F < 1$  için ağ elemanı kısmen dolu olarak tanımlanmaktadır. Serbest su yüzü profilinin Akışkan Hacimleri Yöntemi ile hesaplanmasında “Geo-Reconstruct” yaklaşımı kullanılmıştır [13,14] (Eşitlik 4).

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

### 2.2.3. Çözüm Bölgesi, Sınır ve Başlangıç Şartları

Şekil 2’de, eğrisel geniş başlıklı savak üzerinden geçen açık kanal akımının sayısal modellemesinde kullanılan çözüm bölgesi, başlangıç ve sınır şartları verilmiştir. x-y koordinat takımının orijini olarak, çözüm bölgesinin sol alt köşesi belirlenmiş ve sonuçlar bu tanımlanan eksen takımına göre değerlendirilmiştir. Sayısal çözümde, çözüm bölgesinin çıkış ve üst sınırında sıfır basınç ( $p=0$ ), kanal tabanında ve eğrisel geniş başlıklı savak yüzeyinde sıfır hız sınır şartı, yani  $u=v=0$  olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, giriş sınırın hemen üstünde su bulunmayan kısımda da  $p=0$  sınır şartı verilmiştir. Giriş sınırında ise deneysel verilerden elde edilen yatay doğrultudaki ortalama hız bileşeni  $u=0,289$  m/s ve düşey hız bileşeni  $v=0$ , türbülans şiddeti %5 ve hidrolik yarıçap 0,059 olarak verilmiştir. Başlangıç şartı olarak ise sadece giriş sınırında suyun bu bölgeden girdiğini ifade etmek üzere  $F=1$  ve çözüm bölgesinin tamamı boş yani  $F=0$  olarak tanımlanmıştır.

Sayısal modellemede zamana bağlı çözüm gerçekleştirilmiş, giriş ve çıkış sınırındaki debi farkının toplam debinin %1’inden küçük olduğu durumda sayısal çözüm tamamlanmıştır. Sayısal modellemelerde, courant sayısının ( $C_n = \Delta t / (\Delta x_{ağ} / v_{akım})$ )  $\Delta t$  zaman adımı,  $\Delta x_{ağ}$  hesaplama ağının x doğrultusundaki boyutu,  $v_{akım}$  akım hızı) değerinden küçük olması koşuluna bağlı iterasyon zaman adımı kullanılan program tarafından otomatik olarak belirlenmiştir. Her bir iterasyon adımında yapılan iterasyon sayısı ise 10 olarak seçilmiştir. Ayrıca, süreklilik, x ve y doğrultusundaki hız bileşeni, kinetik enerji ve kinetik enerji özlül kayıp oranı denklemlerinin çözümünde yakınsama kriteri 0,0001 olarak alınmıştır. Akımı idare eden süreklilik ve momentum denklemlerinin çözümünde, sonlu hacimler yöntemine dayalı çözüm yapan ANSYS-Fluent® v.12.1 paket programından yararlanılmıştır.

### 2.2.4. Hesaplama Ağı

Sayısal model sonuçları üzerinde hesaplama ağı tasarımının oldukça etkili olduğu sayısal modelleme

yapanlar tarafından bilinmektedir. Sayısal çözümlerde kaba tasarlanmış (büyük ağ elemanlarından oluşan) hesaplama ağlarından dolayı ayrıklaştırma hata payı büyümekte ve sayısal sonuçların gerçekten uzaklaşmasına neden olmaktadır. Çok ince tasarlanmış (çok küçük ağ elemanlarından oluşan) hesaplama ağına sahip bir sayısal ağla problemin çözümü için ise yüksek kapasiteli bilgisayarlar gerekmekte ve çözümün tamamlanma süresi oldukça uzamaktadır. Bu nedenlerden dolayı, hesaplama ağının en optimum olarak tasarlanması sayısal modelleme sonuçları açısından önemlidir. Hesaplama ağı tasarımı, viskoz alt tabakanın belirlenmesinde ve özellikle sınır tabakasının gelişim gösterdiği katı sınıra yakın bölgedeki hız profillerinin belirlenmesinde oldukça etkin rol oynamaktadır. Özellikle zamana bağlı olarak değişkenlik gösteren hız alanlarının belirlenmesinde hesaplama ağı, sonuçları tamamen değiştirebilmektedir.

Bu çalışmada, farklı ağ eleman boyutlarında ve tiplerinde sayısal modellemeler gerçekleştirilerek, ağ yapısının sayısal model sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Öncelikle düzenli dikdörtgen elemanlardan oluşan farklı yoğunluktaki ağlar tasarlanmıştır. Farklı boyuttaki ağ elemanlardan oluşan sayısal çözüm ağlarına ait bilgiler Çizelge 1’de verilmiştir. Ağ eleman boyutları her defasında yarı yarıya küçültülerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. En küçük (Ağ 4) ve en büyük (Ağ 1) ağ elemanlarından oluşan hesaplama ağları arasında yaklaşık olarak 1.320.000 eleman farkı bulunmaktadır. Ağ 3 ve Ağ 4, hesaplama ağları arasında yaklaşık olarak 1.000.000 adet eleman farkı bulunduğu Çizelgeden görülmektedir. Eleman boyutunun küçülmesiyle birlikte, sayısal modellemenin hesap süresinde de artış olduğu ve maksimum en boy oranının da arttığı Çizelgeden anlaşılmaktadır. En küçük elemanlardan oluşan hesaplama ağı ile en büyük elemanlardan oluşan hesaplama ağı kullanılarak yapılan sayısal analizlerin hesaplama süreleri arasında yaklaşık 11 kat fark olduğu çizelgeden görülmektedir. Sayısal analizlerde, debi sürekliliğinin yaklaşık olarak 30 s’lik çözümlerde sağlandığı belirlenmiştir.

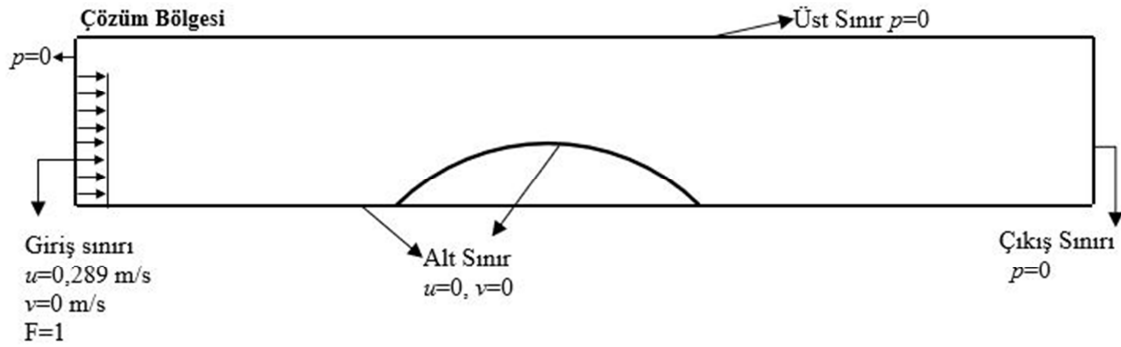
Farklı eleman boyutlarında oluşturulan hesaplama ağı tasarımlarının görüntüleri Şekil 3’te verilmiştir.

Eleman boyutunun küçülmesiyle birlikte, çözüm bölgesinde bulunan eleman sayısının artması sonucunda, hesaplama ağı tamamen siyah bir görüntüye bürünmekte ve ağ elemanlarının ayırtılması mümkün olmamaktadır.

### 2.2.5. Duvar Yakını Modellemesi

Sayısal modellemede, duvar yakını modellemesinde farklı duvar fonksiyonları kullanılmaktadır. Sayısal modellemede kullanılan ANSYS-Fluent paket programı, RNG türbülans modelinde duvar yakını modellemesi için, Standart (St.), Scalable (Sc.), Non-Equilibrium (N.E.), Enhanced (E.) duvar fonksiyonları gibi alternatif seçenekleri sunmaktadır [14]. Bu çalışmada, 4 farklı duvar yakını modellemesi kullanılmış ve duvar yakını modellemesinin sayısal model

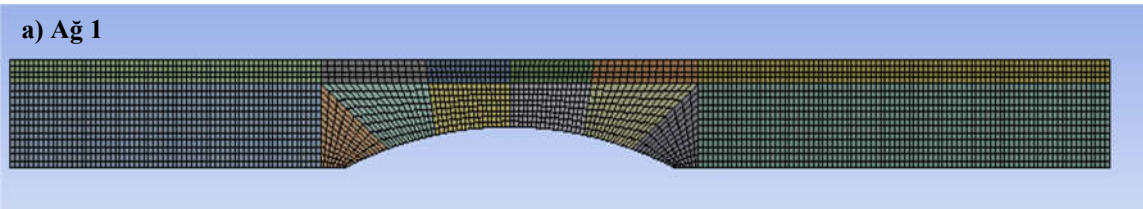
sonuçları üzerine etkileri de araştırılmıştır. Standart duvar fonksiyonu, taban üzerindeki ilk ağ elemanı viskoz alt tabaka içinde olmadığı ve ilk ağ elemanı log-tabaka bölgesinde yer aldığı durumlar için Launder ve Spalding [15] tarafından yapılan çalışmaya dayandırılarak genellikle endüstriyel akımların sayısal modellemesinde oldukça sık kullanılmaktadır. Bu duvar fonksiyonu, katı yüzeylerle sınırlandırılmış akımların birçoğunda oldukça başarılı sonuçlar vermektedir [14]. Non-Equilibrium duvar fonksiyonu, Standart duvar fonksiyonunun başarısız olduğu büyük basınç gradyanına sahip ve dengeli akım durumu bulunmayan problemlerde, Launder ve Spalding [15] tarafından önerilen ortalama hız için log-duvar yasasına, basınç gradyanlarının da etkisini dikkate alan bir modeldir.



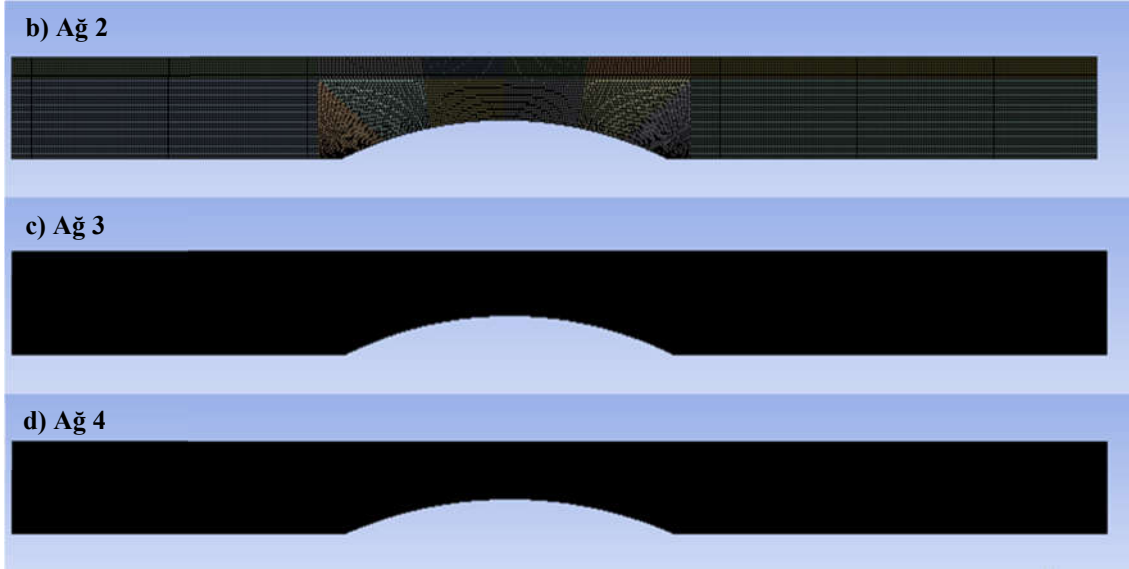
Şekil 2. Sayısal çözüm bölgesi, başlangıç ve sınır şartları

Çizelge 1. Sayısal modellemede kullanılan farklı ağ eleman boyutlarına ait bilgiler

Durum	Eleman boyutu (m)	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	Mak. en boy oranı	Çözüm süresi
Ağ 1	0,01	3.376	10.631	4,70	11 saat
Ağ 2	0,005	13.294	40.881	5,40	24 saat
Ağ 3	0,001	331.418	999.233	6,04	60 saat
Ağ 4	0,0005	1.324.748	3.984.203	6,12	120 saat







Şekil 3. Farklı eleman boyutlarına sahip hesaplama ağları

Ortalama hızın ve türbülansın, yüksek basıncın etkisinde olduğu karmaşık akım problemlerinin sayısal çözümünde duvar yakınının modellenmesinde kullanılması önerilmektedir. Duvara yakın ağ elemanındaki türbülans kinetik enerjisinin miktarını hesaplamak için iki katmanlı temel yaklaşımı benimsemiştir [14,16]. Non-equilibrium ve standart duvar fonksiyonlarının kullanılması, duvara yakın ağ düğümünün tamamen log-law bölgesi içinde bulunduğu kabulünü taşır. Ancak bu durumun, akışla ilişkili değişen geometrik ve hız büyüklükleri nedeniyle genel uygulamalarda gerçekleşmesi zor olabilmektedir. Scalable duvar fonksiyonu, katı sınıra yakın olan ağa yakın noktayı, duvara yakın olup olmasına bakılmaksızın etkin bir şekilde log yasasına uygun sınırlara kaydırarak sınır tabakasının laminar ve geçiş bölgelerinin hatalı modellenmesini önler. Diğer bir ifadeyle, scalable duvar fonksiyonu, standart duvar fonksiyonu yaklaşımının yanında log yasasıyla birlikte kullanılmasını zorunlu kılmaktadır [14]. Enhanced duvar fonksiyonu ise iki katmanlı bir modeldir. Duvara (kanal tabanına veya yan yüzeylere) yakın hesaplama ağının yüksekliği, viskoz alt tabakanın kalınlığından daha az ise bu yöntem kullanılması önerilmektedir [14,17].

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Deneysel ve Sayısal Su Yüzü Profilleri

Eğrisel geniş başlıklı savakla etkileşimde bulunan açık kanal akımının sayısal modellemesinde RNG türbülans modeli kullanılmıştır. Farklı geometrik özelliklere sahip hesaplama ağı tasarımları kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri, deneysel su yüzü profilleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı hesaplama ağı tasarımları kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel profillerle karşılaştırılmasında niceliksel ölçüt olarak Eşitlik 5 ve 6'da sırasıyla verilen Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Göreceli Hata (OMGH) değerleri kullanılmıştır.

$$OKH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (h_d - h_h)^2 \quad (5)$$

$$OMGH = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{h_d - h_h}{h_d} \right| \times 100 \quad (6)$$

Burada, su yüzü profillerinin karşılaştırılmasında  $h_d$  ve  $h_h$  sırasıyla deneysel ve hesaplanan su derinliklerini, hız profillerinin karşılaştırılmasında ise sırasıyla deneysel ve sayısal hız değerini,  $N$

işlem yapılan akım veya hız profilinde ele alınan nokta sayısını göstermektedir.

Düzenli üçgen, düzensiz üçgen ve dikdörtgen geometriye sahip elemanlar kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profili ile karşılaştırılması Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde verilen su yüzü profilleri incelendiğinde, farklı geometriye sahip ağ elemanlarından oluşan hesaplama ağları kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin, deneysel su yüzü profilleri ile oldukça uyumlu olduğu ve sayısal su yüzü profilleri arasında büyük farklılıkların bulunmadığı görülmektedir. Düzenli üçgen elemanlardan oluşan hesaplama ağına kıyasla yaklaşık 2 kat daha fazla eleman bulunmakta ve çözüm süresi de 2 kat artmaktadır. Buradan, farklı geometriye sahip elemanlardan oluşan hesap ağlarının sayısal sonuçlar üzerinde çok da etkili olmadığı belirlenmiştir.

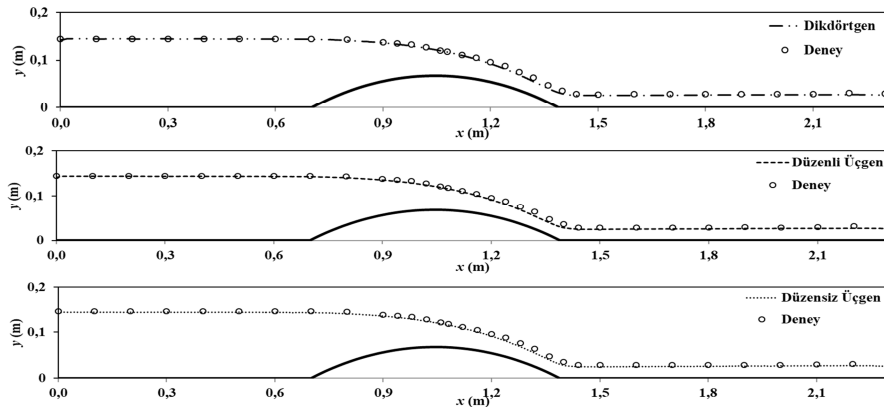
Farklı eleman boyutları kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin, deneysel su yüzü profiliyle karşılaştırılması sonucunda Eşitlik 5 ve 6 kullanılarak elde edilen OKH ve OMGH değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgede verilen değerler

incelendiğinde, en küçük OKH ve OMGH değerlerinin, Ağ 4 durumunda elde edildiği görülmektedir. Eleman boyutunun büyümesiyle birlikte OKH ve OMGH değerlerinde arttığı belirlenmiştir. Ağ 3 kullanılarak elde edilen OMGH değeri ile Ağ 2 kullanılarak elde edilen OMGH değerleri arasındaki fark yaklaşık olarak %9,5 iken, Ağ 4 kullanıldığı durumda bu değer yaklaşık %0,94 olmaktadır. Bu değer bu kadar düşük olması Ağ 3 ve 4 kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğunu göstermesinin yanında yaklaşık 1.000.000 adet fazla ağ elemanının bulunduğu çözüme de gerek duyulmayacağı sonucunu ortaya koymaktadır.

Şekil 5'te, farklı ağ elemanları için elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profiliyle grafiksel karşılaştırılması verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, eleman boyutu 0,01 m için hesaplanan profilin, deneysel su yüzü profilinden daha aşağıda olduğu ve diğer eleman boyutları için hesap edilen profillere göre deneysel ölçümlerle daha uyumsuz olduğu görülmektedir. Eleman boyutunun küçülmesiyle birlikte sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profiline yakınsadığı belirlenmiştir.

**Çizelge 2.** Farklı eleman boyutları kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH (%) değerleri

Ağ 1		Ağ 2		Ağ 3		Ağ 4	
OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
1,2	17,687	0,53	14,681	0,09	5,090	0,06	4,151



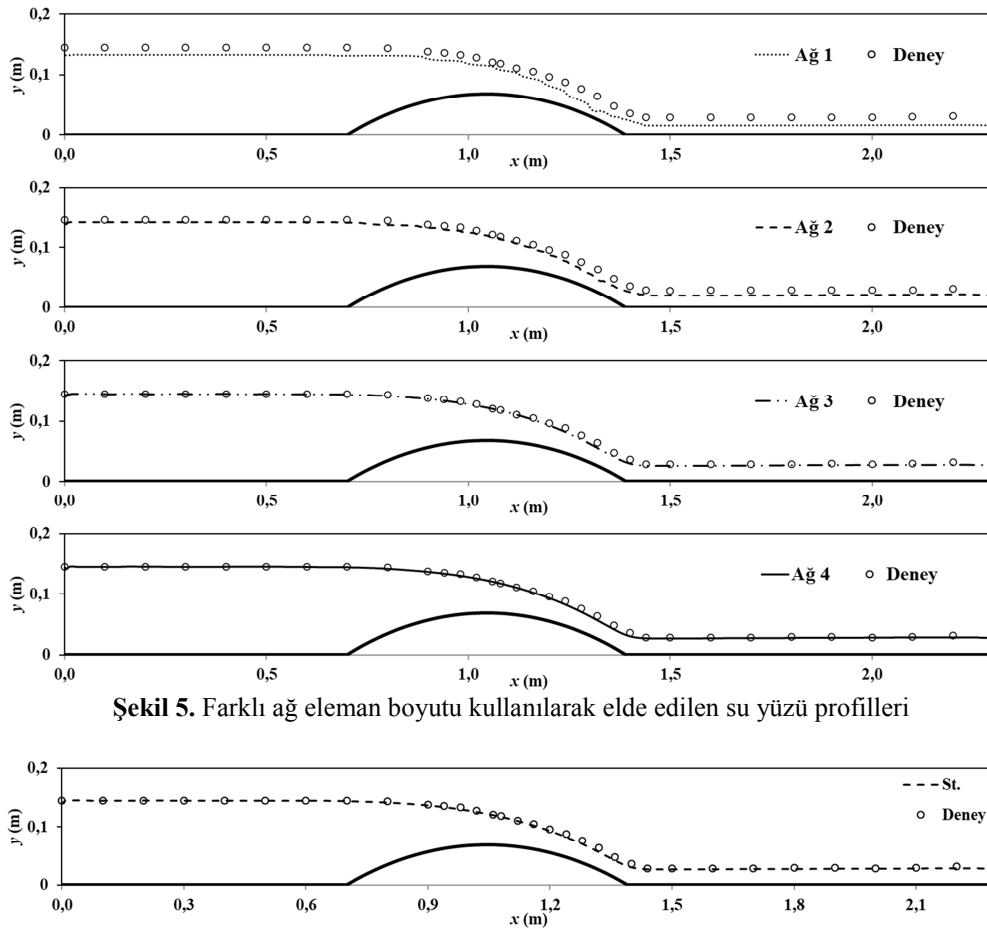
**Şekil 4.** Farklı geometriye sahip ağ elemanları kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri

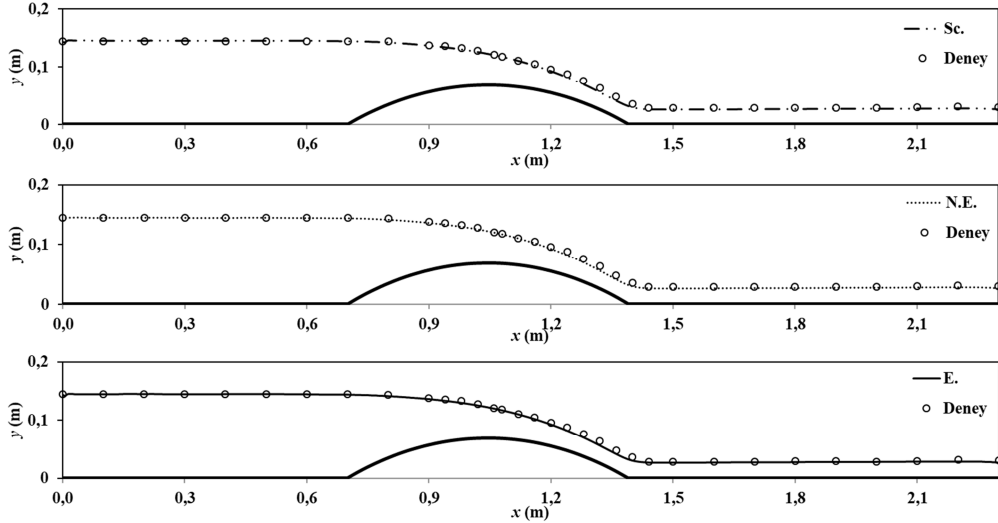
Duvar bölgesi için farklı fonksiyonlar kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel ölçümler ile karşılaştırılması sonucunda elde edilen OKH ve OMGH değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelgeden, OKH ve OMGH değerlerinin birbirine çok yakın olduğu, yani aralarında anlamlı bir farklılığın bulunmadığı söylenebilir. Bunun, sayısal modellemede eleman boyutlarının oldukça küçük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. En küçük OMGH ve OKH değerleri E. duvar fonksiyonu ile elde

edilmiştir. Farklı duvar fonksiyonları kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profillerinin deneysel su yüzü profiliyle grafiksel karşılaştırılması Şekil 6'da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, farklı duvar yakını modellemesinde kullanılan fonksiyonların su yüzü profillerini belirlemede farklılık göstermediği ve deneysel su yüzü profiline oldukça yakın olduğu söylenebilir. Bu sonuç, Çizelge 3'teki değerler ile de paralellik göstermektedir.

**Çizelge 3.** Farklı duvar fonksiyonları kullanılarak elde edilen su yüzü profilleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH (%) değerleri

St.		Sc.		N.E.		E.	
OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0,065	4,207	0,068	4,407	0,069	4,462	<b>0,063</b>	<b>4,151</b>





Şekil 6. Farklı duvar fonksiyonları kullanılarak elde edilen sayısal su yüzü profilleri

### 3.2. Deneysel ve Sayısal Hız Profilleri

Çizelge 4'te, farklı eleman boyutlarına sahip hesaplama ağları kullanılarak kanal boyunca farklı kesitlerde elde edilen hız profillerini, deneysel ölçümlerle niceliksel olarak karşılaştırmak için, Eşitlik 5 ve 6 kullanılarak elde edilen OKH ve OMGH değerleri sunulmuştur. Çizelge 4 incelendiğinde, Ağ 4 kullanılarak elde edilen OKH ve OMGH değerlerinin, diğer eleman boyutlarına ait OKH ve OMGH değerlerine kıyasla küçük olduğu görülmektedir. Ağ 1 ve 2'nin kullanıldığı sayısal çözümlerde, OKH ve OMGH değerlerinin, Ağ 3 için elde edilen değerlerden oldukça büyük olduğu çizelgeden görülmektedir. Buna ilave olarak, Ağ 3 ve 4 kullanılarak elde edilen OKH ve OMGH değerleri arasında oldukça küçük farkların olduğu söylenebilir. Diğer bir ifadeyle, Ağ 3 veya Ağ 4'un kullanılması sayısal modelleme sonuçları üzerinde önemli bir fark oluşturmamaktadır. Bu sonuç, farklı ağ eleman boyutu kullanılarak elde edilen su yüzü profillerinde elde edilen OKH ve OMGH değerleriyle benzerlik göstermektedir. Sonuç olarak çizelgedeki değerlerden eleman boyutunun 0,001 m olarak alınması, ağ eleman boyutunun 0,0005 m olduğu duruma kıyasla, çözüm süresini kısaltması ve daha az bilgisayar donanımı gerektirmesi açısından tercih edilmesi önerilmektedir.

Şekil 7'de, farklı ağ eleman boyutları kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel profilleriyle grafiksel karşılaştırılması verilmiştir. Eğrisel geniş başlıklı savağın memba bölgesinde, ( $x=0-70$  cm) kanal tabanına yakın bölgede eleman boyutunun artmasıyla deneysel ve sayısal hız profilleri arasında farkın arttığı görülmektedir. Genel olarak bu bölgedeki hız profilleri, eleman boyutundan bağımsız olarak, deneysel hız profilleriyle, savak mansap bölgesine kıyasla daha uyumsuzdur. Farklı eleman boyutları için sayısal hız profillerinin kanal tabanından uzaklaştıkça aynı olması, eleman boyutunun kanal tabanına yakın bölgede hız profilleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir. Şekiller incelendiğinde, savak üzerinde ve savak mansap bölgesinde, deneysel ve sayısal hız profilleri arasındaki uyum, memba bölgesine kıyasla oldukça fazladır. Mansap bölgesindeki hız profillerinden, eleman boyutundaki küçülmenin sayısal sonuçlar üzerinde etkili olduğu ve deneysel ölçümlere daha fazla yakınsadığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, Ağ 1 kullanılması durumunda profiller arasında en fazla uyumsuzluğun olduğu da söylenebilir. Ağ 3 ve Ağ 4 kullanılarak elde edilen profillerde bariz farklılıkların bulunmadığı Çizelge 5'teki değerlerden ve şekillerden açıkça görülmektedir.

**Çizelge 4.** Farklı eleman boyutları kullanılarak elde edilen hız profilleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH (%) değerleri

Eleman boyutu (m) $x$ (m) / Kriter	Ağ 1		Ağ 2		Ağ 3		Ağ 4	
	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0,30	14,70	11,33	12,26	10,43	13,50	11,18	17,81	12,23
0,45	16,32	11,53	13,62	10,61	14,29	10,92	15,18	11,22
0,60	18,93	11,94	15,90	10,76	16,16	10,87	16,35	10,97
0,65	7,46	7,87	10,10	10,75	15,32	15,68	15,81	15,91
0,70	8,42	7,13	7,27	6,31	7,48	6,34	8,90	6,86
0,80	48,66	10,78	21,62	7,63	5,30	5,26	4,53	5,14
0,90	86,46	18,43	57,52	16,61	44,18	15,10	40,55	14,51
0,95	120,28	19,38	76,16	16,68	57,55	15,02	53,59	14,47
1,00	133,71	15,76	45,04	11,59	45,42	11,65	48,34	11,92
1,05	249,43	11,79	88,13	7,43	9,66	4,30	9,39	4,21
1,06	253,50	11,49	80,71	7,02	7,54	3,71	11,58	4,29
1,10	382,61	11,36	117,54	5,06	0,88	0,79	5,94	1,32
1,15	643,83	15,15	204,89	7,13	2,56	1,25	4,42	1,64
1,20	1271,77	20,98	497,68	11,01	40,73	4,10	15,97	3,42
1,30	4061,35	46,01	1124,87	17,30	45,65	3,42	6,40	1,84
1,40	356,46	10,32	87,44	5,28	7,60	1,90	17,18	2,71
1,45	3173,08	32,47	967,22	14,34	47,73	3,60	16,37	2,69
1,50	2962,04	32,47	853,74	13,30	25,59	3,00	18,44	2,88
1,70	2528,45	31,59	724,92	13,02	33,04	2,71	7,88	1,76
1,90	2639,95	32,33	838,92	13,70	44,73	3,37	10,27	1,87
2,10	2273,43	31,03	758,39	12,94	61,80	3,10	10,57	1,46
2,20	1829,77	29,51	519,77	12,05	5,69	1,58	10,74	1,98
<b>Ortalama</b>	1049,12	19,57	323,81	10,95	25,11	6,31	<b>16,65</b>	<b>6,15</b>

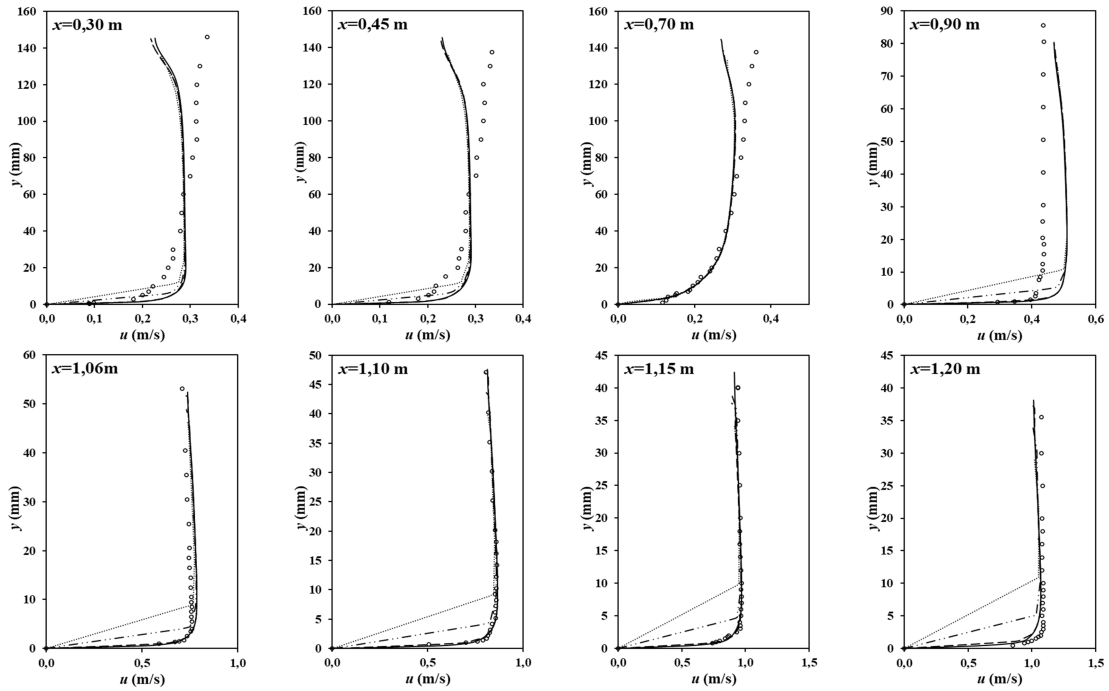
Farklı duvar fonksiyonları için hesaplanan hızlar ile sayısal hızların karşılaştırılmasından elde edilen OKH ve OMGH değerleri Çizelge 5'te sunulmuştur. En küçük OKH ve OMGH değerleri, su yüzü profillerine benzer olarak, E. duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir. Duvar fonksiyonlarının başarısı sıralamasının E., N.E., St. ve Sc. şeklinde olduğu belirlenmiştir. Duvar fonksiyonlarının hız alanını belirlemede oldukça benzer sonuçlar verdiği OKH ve OMGH değerlerinden anlaşılmaktadır. Seçilen duvar fonksiyonunun sayısal sonuçlar üzerindeki etkisinin daha anlaşılır ve çözümler arasındaki farkın daha net olabilmesi için daha kaba ağ elemanlarından oluşan hesaplama ağın oluşturulması ve sonuçlarının karşılaştırılması gerekmektedir.

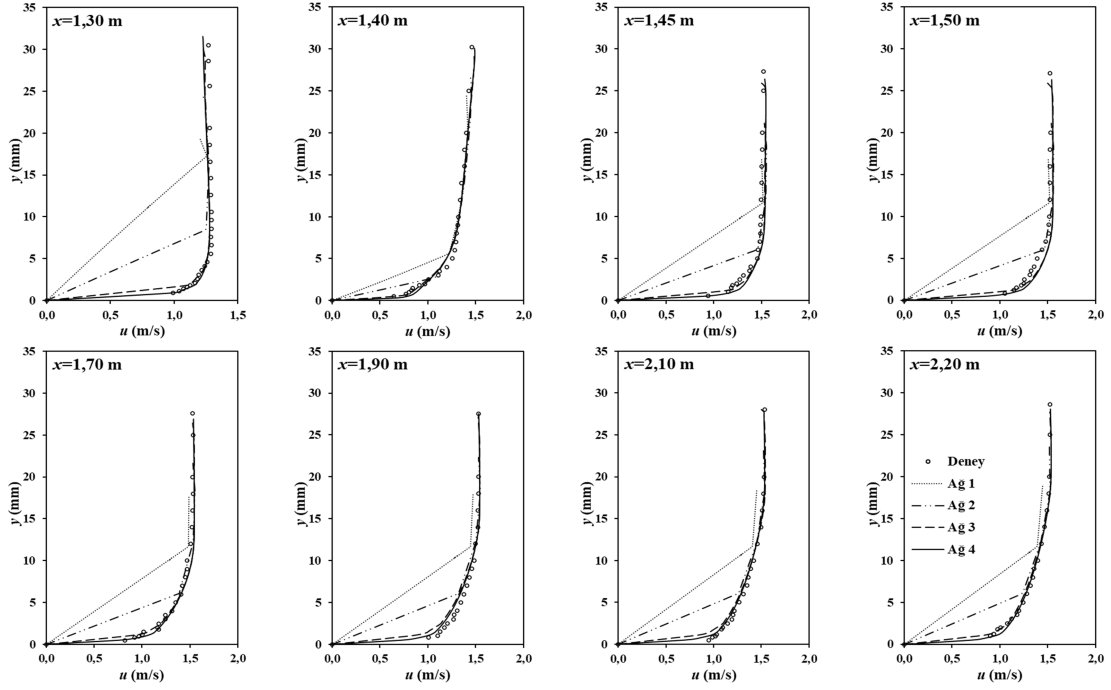
Farklı duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilen sayısal hız profillerinin deneysel hız profilleriyle

grafiksel olarak karşılaştırılması Şekil 8'de verilmiştir. Şekilde, farklı akım özelliklerine sahip savak memba, üstü ve mansap bölgelerinde temsili seçilen kesitlerdeki profilleri sunulmuştur. Savak mansap bölgesi  $x=2,20$  m kesitinde, farklı duvar fonksiyonları kullanılarak elde edilen hız profilleri arasında fark bulunmadığı ve sayısal profillerin deneysel hız profili ile de oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Savak memba bölgesi  $x=0,30$  ve  $0,70$  m kesitlerinde ise katı sınıra yakın bölgede duvar fonksiyonları arasında farklılık söz konusudur. Savak üstünde,  $x=0,8$ ,  $1,06$  ve  $1,20$  m kesitlerinde, katı sınıra yakın bölgenin modellenmesinde tercih edilen yaklaşımın hız profili üzerindeki etkisinin azaldığı ifade edilebilir. Genel olarak, duvar fonksiyonunun viskoz alt tabaka ve sınır tabakası kalınlığının fazla olduğu memba bölgesindeki hız profilleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

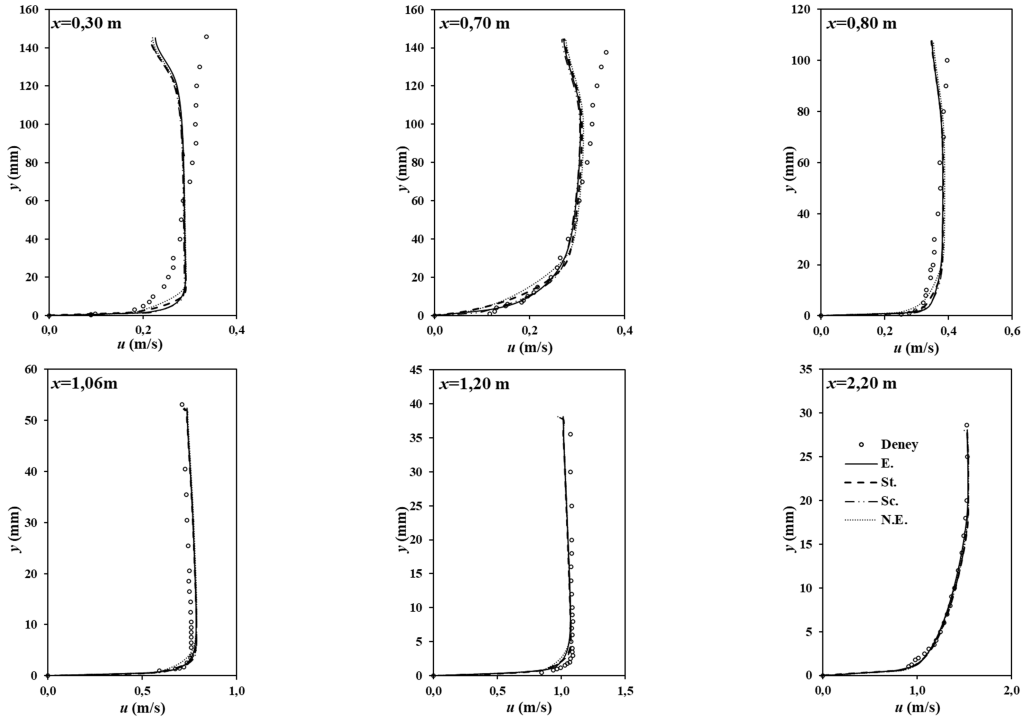
**Çizelge 5.** Farklı duvar fonksiyonları kullanılarak elde edilen hız profilleri için hesaplanan OKH ( $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ) ve OMGH (%) değerleri

Duvar Fonk.	St.		Sc.		N.E.		E.	
$x$ (m)/Kriter	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH	OKH	OMGH
0,30	17,81	12,23	20,85	12,99	19,45	12,26	17,54	11,54
0,45	15,18	11,22	15,68	11,41	13,35	10,30	11,65	9,29
0,60	15,10	10,97	15,41	11,37	14,09	9,56	12,92	8,09
0,65	15,81	15,91	16,26	16,52	10,76	12,91	8,76	11,19
0,70	8,90	6,86	9,28	7,05	9,02	7,81	8,55	7,91
0,80	4,53	5,14	4,68	5,17	4,53	5,04	4,54	5,06
0,90	40,55	14,51	41,40	14,69	43,00	14,96	40,40	14,34
0,95	53,59	14,47	54,43	14,59	55,01	14,64	51,95	14,20
1,00	48,34	11,92	51,02	12,11	47,52	11,79	46,58	11,66
1,05	9,39	4,21	10,41	4,37	9,34	4,24	11,39	4,63
1,06	11,58	4,29	13,89	4,49	11,38	4,22	14,21	4,69
1,10	5,94	1,32	8,29	1,56	6,62	1,42	8,59	1,76
1,15	4,42	1,64	5,11	1,65	4,52	1,56	5,63	1,65
1,20	15,97	3,42	15,70	3,31	14,70	3,14	17,09	3,38
1,30	6,40	1,84	7,13	1,89	6,44	1,79	5,41	1,64
1,40	18,09	2,76	10,53	2,02	9,16	2,10	11,41	2,27
1,45	16,31	2,69	22,53	3,15	19,35	2,95	16,50	2,80
1,50	18,44	2,88	30,43	3,46	27,83	3,30	24,65	3,27
1,70	7,84	1,75	14,74	2,40	14,49	2,40	11,22	2,10
1,90	10,11	1,85	9,00	1,85	9,30	1,86	11,18	2,11
2,10	10,14	1,45	7,58	1,38	7,72	1,42	6,16	1,31
2,20	10,74	1,98	16,48	2,59	16,72	2,62	17,94	2,52
<b>Ortalama</b>	<b>16,60</b>	<b>6,15</b>	<b>18,22</b>	<b>6,37</b>	<b>17,01</b>	<b>6,01</b>	<b>16,56</b>	<b>5,79</b>





Şekil 7. Farklı ağ eleman boyutları kullanılarak elde edilen sayısal hız profilleri



Şekil 8. Farklı duvar fonksiyonları kullanılarak elde edilen sayısal hız profilleri

#### 4. SONUÇLAR

Eğrisel geniş başlıklı savak akımını idare eden temel denklemlerin sayısal çözümleri, sonlu hacimler yöntemine dayalı ANSYS-Fluent paket programı yardımıyla yapılmıştır. Sayısal modellemede, serbest su yüzü profilleri akışkan hacimleri yöntemiyle hesaplanmıştır. Dört farklı ağ eleman sayısı ve dört farklı duvar fonksiyonu kullanılarak hesaplanan akım hızları ve su yüzü profilleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Hesaplama ağında kullanılan eleman boyutlarının küçültülmesi ile sayısal su yüzü ve hız profillerinin deneysel ölçümlere yakınsadığı ancak belli bir noktadan sonra küçültmenin sonuçlar üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Enhanced duvar fonksiyonu kullanılarak elde edilen sayısal hız ve akım profillerinin bu çalışmada kullanılan diğer duvar modellerine kıyasla daha başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Su yüzü profillerinin sayısal hesaplamalarında, katı sınıra yakın bölgenin modellemesinde kullanılan duvar fonksiyonlarının etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Ayrıca, hesaplama ağını oluşturan elemanların farklı geometrik şekillerde olmasının sayısal bulgular üzerindeki etkisi net olarak görülememiştir.

#### 5. KAYNAKLAR

1. Telkiran, M.N., Aköz, M.S., Şimşek, O., Soydan, N.G., 2019. Dolusavak Üzerinden Geçen Akımın Sayısal Analizi: Mersin Dereyurt Göleti Dolusavak Örneği, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 34(1), 155-167.
2. Şimşek, O., Soydan, N.G., Gümüş, V., Aköz, M.S., Kırkgöz, M.S., 2015. Ani Bir Düşüdeki B-tipi Hidrolik Sıçramanın Sayısal Modellemesi, İMO Teknik Dergi, 26(4), 7215-7240.
3. Gümüş, V., Şimşek, O., Soydan, N.G., Aköz, M.S., Kırkgöz, M.S., 2015. Numerical Modeling of Submerged Hydraulic Jump from a Sluice Gate, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(1), 04015037.
4. Soydan, N.G., Şimşek, O., Aköz, M.S., 2018. Köprü Ayağı Etrafındaki Türbülanslı Akımın Sayısal ve Deneysel Analizi, Politeknik Dergisi, 21(1), 137-147.
5. Aköz, M.S., Soydan, N.G., Şimşek, O., 2016. Kritik Üstü Açık Kanal Akımının Detached Eddy ve Large Eddy Simülasyon ile Sayısal Modellenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C, Tasarım ve Teknoloji, 4(4), 213-224.
6. Lee, C.H., Xu, C., Huang, Z., 2019. A Three-phase Flow Simulation of Local Scour Caused By a Submerged Wall Jet with a Water-air Interface, Advances in Water Resources, 129, 373-384.
7. Soydan, N.G., Aköz, M.S., Şimşek, O., Gümüş, V., 2012. Trapez Kesitli Geniş Başlıklı Savak Akımının k-ε Tabanlı Türbülans Modelleri ile Sayısal Modellenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 27(2), 47-58.
8. Kırkgöz, M.S., Aköz, M.S., Öner, A.A., 2009. Numerical Modeling of Flow Over a Chute Spillway, Journal of Hydraulic Research, 47(6), 790-797.
9. Çelik, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., 2008. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME, 130 (7).
10. Şimşek, O., Parmaksız, M., Gümüş, V., 2019. Radyal Kapak ile Etkileşimde Bulunan Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 965-978.
11. Şimşek, O., Aköz, M.S., Soydan, N.G., 2016. Numerical Validation of Open Channel Flow Over a Curvilinear Broad-crested weir, Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, 16(6), 364-378.
12. Yakhot, V., Orszag, S.A., 1986. Renormalization-group Analysis of Turbulence, Physical Review Letters, 57(14), 1722-1724.
13. Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, 39(1), 201-225.
14. ANSYS, FLUENT Theory Guide. USA: ANSYS Inc., 2012.



15. Launder, B.E., Spalding, D.B., 1974. The Numerical Computation of Turbulent Flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 269-289.
16. Kim, S., 1995. A Near-wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient, Separated and Complex Flows, In ASME FED, 217.
17. Huang, P., Bradshaw, P., Coakley, T., 1993. Skin Friction and Velocity Profile Family for Compressible Turbulent Boundary Layers, AIAA Journal, 31(9), 1600-1604.



## LiBr-Su Çözeltili Absorpsiyonlu Soğutma Çevriminin Soğutma Etkinliğinin Çeşitli Şartlarda Simülasyonu

Mehmet Tahir ERDİNÇ<sup>1</sup>, Arif Emre AKTAŞ<sup>\*2</sup>, Alper YILMAZ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus

<sup>2</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 30.01.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

İhmal edilebilir çevresel etkisi, oluşturduğu düşük gürültü ve titreşimi nedeniyle en çok tercih edilen sistemlerden biri absorpsiyonlu soğutma sistemleridir. Mekanik kompresörün bulunmadığı bu sistemlerde hareketli parça olarak sadece pompa bulunur. Günümüzde özellikle düşük dereceli atık ısılarından yararlanılarak soğutma elde edilmesinde tercih edilir. Yüksek kapasiteli iklimlendirme sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca gaz türbini atık ısısından yararlanmada bu tür soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıktaki uygun soğutma etkinliği katsayıları nedeniyle LiBr - Su sistemleri tercih edilmektedir. Bu çalışmada, LiBr-Su çözeltili absorpsiyonlu soğutma çevriminin bütün noktaları belirlenmiş ve çeşitli durumlara bağlı olarak soğutma etkinliğinin hesaplanması yapılmıştır. 50 kW'lık bir sistem için, soğutma etkinliğinin soğutma suyu sıcaklığı, ısıtma suyu sıcaklığı ve soğutulacak suyun sıcaklığının fonksiyonu olarak hesaplanması yapılmıştır. Sistem etkinlik katsayısının ısıtma suyu ve soğutulacak suyun sıcaklığı ile arttığı buna karşın soğutma suyu sıcaklığıyla azaldığı görülmüştür. Ayrıca sistemdeki cihazların her birinin eşanjör analizi de yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Atık ısı, Soğutma, LiBr-su çözeltisi, Absorpsiyon soğutma

### Simulation of LiBr-Water Absorption Refrigeration Cycle Cooling Performance at Various Conditions

#### Abstract

Absorption cooling systems are one of the most preferred systems due to their negligible environmental impact, low noise, and vibration. These systems without mechanical compressors only contain pumps as moving parts. Nowadays, it is especially preferred for obtaining cooling by using low grade waste heat. They are widely used in high capacity air conditioning systems. Such cooling systems are used to utilize the gas turbine waste heat. LiBr-Water systems are preferred due to their acceptable coefficient of performance at low temperatures. In this study, all points of the LiBr-Water absorption cooling cycle calculation are determined and cooling performance at various conditions is carried out. Cooling performance is calculated for a 50 kW system as a function of cooling water temperature, heating water temperature and cooled water temperature. It is observed that cooling performance of the system increases with the temperature of the heating water and the water to be cooled, but decreases with the cooling water temperature. In addition, heat exchangers in the system are also analyzed.

**Keywords:** Waste heat, Refrigeration, LiBr-Water solution, Absorption cooling

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Arif Emre AKTAŞ, [aeaktas@cu.edu.tr](mailto:aeaktas@cu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Güneş enerjisinin kullanıldığı soğutma teknolojileri özellikle yaz aylarında Akdeniz ikliminde geleneksel soğutma sistemlerinin yoğun elektrik gereksinimi nedeniyle son yıllarda yaygınlık göstermektedir. Akdeniz'e ek olarak özellikle Avrupa'nın güney kesimlerinde solar enerjili soğutma sisteminin kullanım oranı %50'lere ulaşmıştır [1,2]. Güneş kuşağı içinde yer alan ülkemizde de son 10 yılda güneş paneli kullanım sayısı yaklaşık 4 kat artmıştır [3].

İklimlendirme sistemlerinden biri olan olarak güneş enerjisi ile absorpsiyonlu soğutma üzerine çalışmalar birçok araştırmacı tarafından ayrıntılı olarak ele alınmıştır [4-7]. İklimlendirme sistemleri içerisinde absorpsiyonlu soğutma ile diğer çeşitli soğutma sistemleri Pridasawas [8] tarafından incelenmiştir. Bunlara basit tek etkili, çift etkili ve difüzyonlu absorpsiyon (Platen Munters) çevrimi örnek olarak verilebilir [8]. Absorpsiyonlu soğutma sistemlerinin jeotermal santrallere entegre çalışmaları üzerine geniş bir araştırma Tesha [9] tarafından gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisi ile soğutma teknolojileri hakkında genel bilgiler Büyükalaca ve Yılmaz [10] tarafından açıklanmıştır. LiBr-H<sub>2</sub>O sistemlerinin termodinamik hesapları hakkında ASHRAE [11] Klein ve Nellis [12], Florides ve arkadaşları [13] ve Herold ve arkadaşları [14] tarafından temel bilgiler verilmiştir.

Absorpsiyonlu soğutma çevriminin termodinamik performansını arttırmaya yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Martinho ve arkadaşları [15] tek etkili absorpsiyonlu soğutma çevriminin boyutsuz bir matematiksel modelini geliştirmişler ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Chen ve arkadaşları [16] farklı akışkanların kullanıldığı absorpsiyonlu soğutma çevriminin termodinamik analizini yapmış ve LiBr-Su kullanılan sistemden elde edilen COP'nin Cu<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>-Su kullanıldığında daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Táboas ve arkadaşları [17] gemi motoru atık ısısından yararlanan amonyağın soğutucu akışkan olarak kullanıldığı absorpsiyonlu soğutma çevrimini

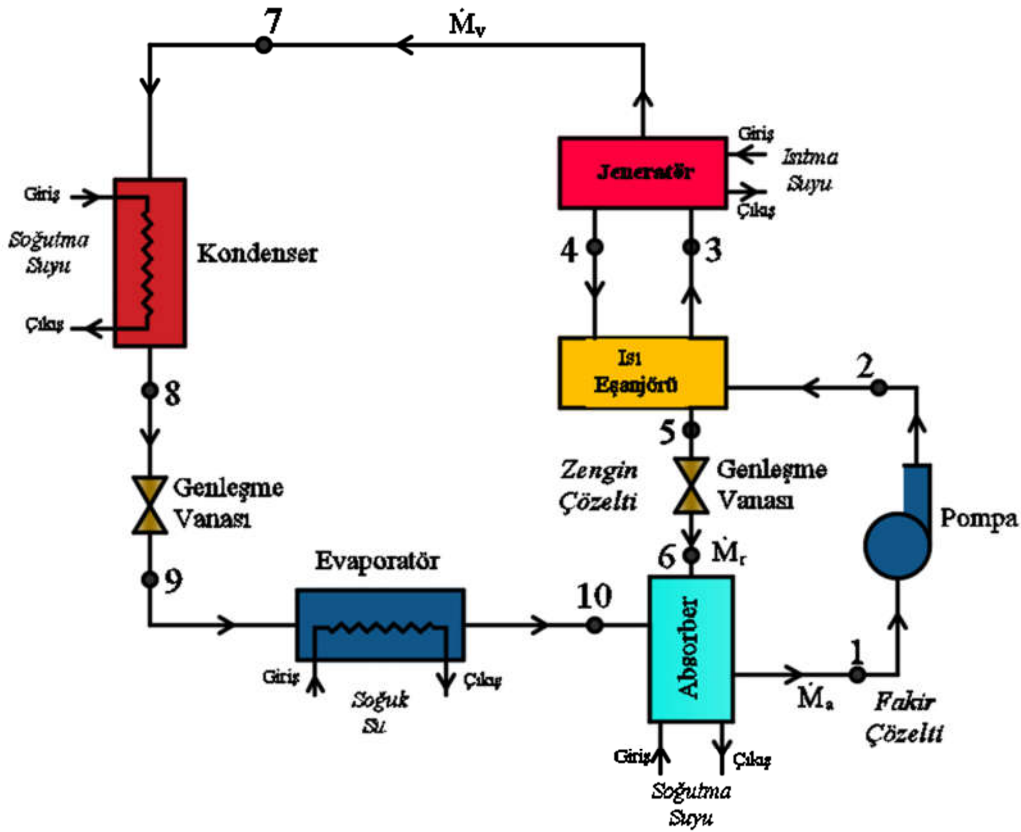
teorik olarak incelemişler ve 0,5 üzerinde COP değerleri elde etmişlerdir. Chen ve arkadaşları [18] ana parametre olarak emme basınç değeri ve basınç oranının kullanıldığı bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Çalışmanın sonucunda optimum şartlardaki COP değerlerinin konvansiyonel çevrime göre %16,7 kadar yükseltilebileceği görülmüştür. Farshi ve arkadaşları [19] ejektörün kullanıldığı absorpsiyonlu kombine çevrimi incelemişler ve tek etkili absorpsiyonlu çevrime göre kısmen daha yüksek COP değeri elde etmişlerdir. Özellikle daha düşük sıcaklıklarda bu farkın daha belirgin olduğu görülmüştür. Mohtaram ve arkadaşları [20] LiBr-su kullanılan absorpsiyonlu soğutma çevriminin ekserji analizini yapmış ve en büyük ekserji kaybının absorberde olduğu sonucuna ulaşmıştır. Liang ve arkadaşları [21] soğutucu akışkan olarak amonyağın kullanıldığı çift ejektörlü kombine absorpsiyonlu soğutma çevriminin termodinamik incelemesini numerik olarak yapmışlardır. Sıvı-buhar ejektör absorber girişine, buhar tahrikli ejektörü ise jeneratörün çıkışına yerleştirmişlerdir. Sonuç olarak 0,64'lere varan COP değerlerine ulaşılmıştır. Cai ve arkadaşları [22] NH<sub>3</sub>-NaSCN and NH<sub>3</sub>.LiNO<sub>3</sub> çözeltilerinin soğutucu akışkan olarak kullanıldığı absorpsiyon soğutma sisteminin deneysel incelemesini yapmıştır. Sonuçlar NH<sub>3</sub>.NaSCN çözeltili kullanıldığında daha yüksek COP elde edildiğini ortaya koymuştur. Özgören ve arkadaşları [23] amonyak-su çözeltili solar absorpsiyonlu soğutma sisteminin saatlik performans analizini yapmıştır. Sistemin 3,5 kW'lık bir soğutma yükü için 35,95 m<sup>2</sup> kolektör yüzey alanı bulunmuştur. Absorpsiyonlu soğutma sistemleri çeşitli kitaplarda ele alınmıştır [24-26].

Bu çalışmada LiBr-H<sub>2</sub>O çözeltili soğutma sisteminin hesaplanması açıklanmış ve bilhassa kaynak sıcak su ve elde edilen soğuk su sıcaklıklarının sistem performansına etkileri ayrıntılı bir şekilde tartışılmıştır. Sistemin gerçek soğutma etkinliği ve Carnot soğutma etkinliği arasındaki bağıntı araştırılmıştır. Ayrıca sistemdeki enerji transferi olan cihazların her birine ait eşanjör analizi de yapılmıştır.

## 2. ÇEVİRİMİN AÇIKLANMASI

İncelenen absorpsiyonlu soğutma sistemi Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir. Sistemde H<sub>2</sub>O soğutucu akışkan ve LiBr de absorbe eden akışkan olarak kullanılmaktadır. Absorberden çıkan fakir çözelti, pompa tarafından P<sub>e</sub> basıncından P<sub>k</sub> jeneratör basıncına yükseltilmektedir. Isı değiştiricisinde sıcaklığı yükseltilerek 3 noktasında jeneratöre iletilmektedir. Burada çözelti ısıtılmakta ve bir kısım su çözeltiden buharlaşarak kondensere gitmektedir. Bundan dolayı çözelti LiBr bakımından zenginleşerek 4 noktasına gelmektedir. LiBr bakımından zengin çözelti ısı

değiştiricisi vasıtasıyla ısısının bir kısmını fakir çözeltiliye aktarmakta ve genişleme vanasında P<sub>e</sub> basıncına düşürülerek 6 noktasından absorbere iletilmektedir. Kondensere 7 noktasından gelen su buharı burada P<sub>k</sub> basıncında yoğunlaşmakta ve doymuş su da genişleme vanası üzerinden 9 noktasından evaporatöre iletilmektedir. Evaporatörde su buharlaşarak soğutması istenen suyu soğutmakta ve doymuş buhar olarak absorbere gelerek çözelti tarafından emilmektedir. Fakirleşen çözelti pompa tarafından üst P<sub>k</sub> basıncına çıkarılarak çevrim tamamlanmaktadır. Absorpsiyon esnasındaki ısı da soğutma suyu tarafından alınmaktadır.



Şekil 1. LiBr-H<sub>2</sub>O soğutma makinesinin şematik gösterimi

## 3. TERMODİNAMİK HESAPLAR

Bu soğutma çevriminin hesaplanabilmesi için gerekli eşitlikler, ısı ve kütle bilançoları ve

cihazlardan çıkış durumları için yapılacak varsayımlardan yararlanılarak elde edilmiştir. Termodinamik model şu varsayımlar göz önünde bulunarak yapılmıştır:

- (i) Isı ve sürtünme kayıpları ihmal edilmiştir.  $\dot{M}_v = \dot{M}_a - \dot{M}_r$  (7)  
(ii) Kararlı durum şartları kabul edilmiştir.  
(iii) Potansiyel ve kinetik enerji değişimi ihmal edilmiştir.  $\dot{M}_a x_a = \dot{M}_r x_r$  (8)

Pompadaki enerji bilançosu fakir eriyik debisi  $\dot{M}_a$  ile şeklindedir (Eşitlik 1).

$$\dot{M}_a (h_2 - h_1) = \dot{W}_p \quad (1)$$

$\dot{W}_p$  ise pompa izentropik verimi  $\eta_p$  dikkate alınarak Eşitlik 2 yardımı ile hesaplanır.

$$\dot{W}_p = \frac{\dot{M}_a (P_k - P_e)}{\rho_1 \eta_p} \quad (2)$$

Isı eşanjöründeki enerji bilançosundan da  $\dot{M}_r$  zengin eriyik debisi ile elde edilir (Eşitlik 3).

$$\dot{M}_a (h_3 - h_2) = \dot{M}_r (h_4 - h_5) \quad (3)$$

Isı eşanjörü etkinliği olarak  $\epsilon_e$  kabul edildiğinde de 2, 4 ve 5 noktalarındaki sıcaklıklar için Eşitlik 4'teki gibi yazılabilir:

$$T_5 = \epsilon_e \cdot T_2 + (1 - \epsilon_e) T_4 \quad (4)$$

Jeneratöre verilen ısı  $\dot{Q}_g$  de, genişleme vanasından iletilen akışkan debisi  $\dot{M}_r$  ile şekilde elde edilir [24] (Eşitlik 5).

$$\dot{Q}_g = \dot{M}_r h_4 + \dot{M}_v h_7 - \dot{M}_a h_3 \quad (5)$$

Burada  $\dot{M}_v$  ve  $\dot{M}_a$  sırasıyla kondensere iletilen ve ısı eşanjöründen jeneratöre geçen akışkan debileridir.  $\dot{Q}_g$  aynı zamanda aşağıdaki eşitlik yardımıyla da hesaplanır (Eşitlik 6).

$$\dot{Q}_g = \dot{M}_h \cdot c_{ph} (T_{hg} - T_{hc}) \quad (6)$$

Burada  $c_{ph}$  sıcak suyun özgül ısısıdır.  $\dot{M}_h$  sıcak suyun kütledebisi ve  $T_{hg}$  ve  $T_{hc}$  ise sıcak su giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır (Eşitlik 7 ve 8). Jeneratördeki kütle

bağıntıları yardımıyla elde edilir. Burada buhar içindeki LiBr ihmal edilmiştir. Bu kütle bilançoları absorber için de geçerlidir. Absorberdeki enerji bilançosundan aşağıdaki denklem elde edilir (Eşitlik 9):

$$\dot{M}_r h_6 + \dot{M}_v h_{10} = \dot{M}_a h_1 + \dot{Q}_a \quad (9)$$

Absorberde atılan ısı  $\dot{Q}_a$  için ayrıca eşitliği yazılabilir (Eşitlik 10).

$$\dot{Q}_a = \dot{M}_{ca} \cdot c_{pca} (T_{caç} - T_{cag}) \quad (10)$$

Burada  $\dot{M}_{ca}$  absorbere verilen soğutma suyu kütledebisi,  $c_{pca}$  da bu suyun özgül ısısıdır.  $T_{cag}$  ve  $T_{caç}$  sıcaklıkları da bu suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır.

Bunların yanısıra, genişleme vanasındaki proses izentalp (sabit entalpi) kabul edildiğinden eşitliği geçerlidir (Eşitlik 11).

$$h_6 = h_5 \quad (11)$$

Soğutucu akışkan devresinde ise kondenserdeki enerji bilançosundan yazılır (Eşitlik 12).

$$\dot{Q}_k = \dot{M}_v (h_7 - h_8) \quad (12)$$

Ayrıca, kondenserde soğutucu suya verilen ısı da aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir (Eşitlik 13):

$$\dot{Q}_k = \dot{M}_{ck} \cdot c_{pck} (T_{ckç} - T_{ckg}) \quad (13)$$

Bu eşitlikte  $\dot{M}_{ck}$  kondensere verilen soğutma suyunun kütledebisi,  $c_{pck}$  ise bu suyun özgül ısısıdır.  $T_{ckç}$  ve  $T_{ckg}$  sıcaklıkları da bu suyun çıkış ve giriş sıcaklıklarıdır.

Genleşme vanasındaki durum değişimi izentalp kabul edildiğinden Eşitlik 14 yazılabilir.

$$T_{10}=T_{ceg}-8 \quad (20)$$

$$h_9=h_8 \quad (14)$$

$T_1$  ve  $T_4$  sıcaklıkları da jeneratör ve absorber giriş sıcaklıklarının fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi kabul edilir [25] (Eşitlik 21 ve 22):

Evaporatördeki enerji bilançosu yardımıyla yazılır (Eşitlik 15).

$$T_1=T_{cag}+8 \quad (21)$$

$$\dot{Q}_e=\dot{M}_v(h_{10}-h_9) \quad (15)$$

$$T_4 = T_{hg} - 8 \quad (22)$$

Ayrıca evaporatördeki soğutulan su kütesel debisi  $\dot{M}_{ce}$  ile de Eşitlik 16'daki gibi yazılabilir:

Çözelti entalpileri ise 1-6 noktaları arasındaki bu noktalardaki sıcaklıklar ve konsantrasyon  $x$ 'in fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi hesaplanır (Eşitlik 23):

$$\dot{Q}_e = \dot{M}_{ce} \cdot c_{pce} (T_{ceg} - T_{ceç}) \quad (16)$$

Bu eşitlikteki  $c_{pce}$  bu suyun özgül ısıdır.  $T_{ceg}$  ve  $T_{ceç}$  sıcaklıkları ise bu suyun giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır.

$$h_i=f(T_i, x_i, (\text{LiBr-Su})) \quad (23)$$

7, 8 ve 10 noktalarındaki entalpiler de şekilde hesaplanabilir (Eşitlik 23).

Sistemin analiz edilebilmesi için bazı noktalarda akışkan durumları için varsayımlar yapılmalıdır. Buna göre; kondenser ve jeneratördeki  $P_k$  basıncı eşit kabul edilmiştir. Su saf su ve 8 noktasındaki durumu ise doymuş sıvı kabul edilerek Eşitlik 17'deki gibi yazılır.

$$h_i=f(T_i, x_i, (\text{Su})) \quad (24)$$

$$P_k=f(T_8) \quad (17)$$

Ancak burada 7 ve 10 noktalarında doymuş buhar varsayımından dolayı  $x=1$  ve 8 noktasında da doymuş su varsayımından dolayı  $x=0$  olarak alınır. Ayrıca 9 noktasındaki sıcaklık denkleminde (Eşitlik 25),

Burada  $T_8$  de kondenser soğutma suyu giriş sıcaklığına bağlı olup aşağıdaki eşitliğin geçerli olduğu kabul edilmiştir [25] (Eşitlik 18):

$$T_9 = f(P_e, h_9) \quad (25)$$

$$T_8 = T_{ckg} + 8 \quad (18)$$

kuruluk derecesi de bağıntısından hesap edilebilir (Eşitlik 26).

Ayrıca, evaporatör tarafındaki basınç  $P_e$  de  $T_{10}$  da doymuş buhar varsayımıyla hesaplanmıştır (Eşitlik 19):

$$x_9=f(P_e, h_9) \quad (26)$$

$$P_e=f(T_{10}) \quad (19)$$

Sistem soğutma etkinliği  $COP_s$  de eşitliğinden hesaplanırken (Eşitlik 27),

$T_{10}$  sıcaklığı ise, evaporatörde soğutulacak suyun giriş sıcaklığından aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla elde edilir [25] (Eşitlik 20).

$$COP_s = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad (27)$$

Carnot etkinliği [24, 26] (Eşitlik 28), bağıntısından hesaplanabilir.

$$COP_C = \left[ 1 - \left( \frac{T_{ckg}}{T_{hg}} \right) \right] \cdot \left[ \frac{T_{ceg}}{T_{ckg} - T_{ceg}} \right] \quad (28)$$

#### 4. EŞANJÖR ANALİZİ

Örnek hesaplamalara esas alınan çevrim değerleri Çizelge 1’de ve hesaplanan sonuçlar da Çizelge 2’de verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan tüm ısı eşanjörleri boru demeti şeklinde ve hem içten hem de dıştan tek geçişli ve karşıt akışlı olarak kabul edilmiştir. Bundan dolayı da Eşitlik 29’a göre hesaplanır.

$$\dot{Q} = U F \Delta T_m \quad (29)$$

Burada U ve F sırasıyla toplam ısı transfer katsayısı ve toplam ısı transfer yüzey alanıdır. Cihazlardaki logaritmik ortalama sıcaklık değerleri  $\Delta T_m$ ’ler aşağıdaki gibi yazılabilir [14] (Eşitlik 30-34):

$$\Delta T_{ma} = \frac{(T_6 - T_{caç}) - (T_1 - T_{cag})}{\ln \frac{T_6 - T_{caç}}{T_1 - T_{cag}}} \quad (30)$$

$$\Delta T_{mk} = \frac{(T_8 - T_{ckg}) - (T_8 - T_{ceç})}{\ln \frac{T_8 - T_{ckg}}{T_8 - T_{ceç}}} \quad (31)$$

$$\Delta T_{mg} = \frac{(T_{hg} - T_4) - (T_{hg} - T_7)}{\ln \frac{T_{hg} - T_4}{T_{hg} - T_7}} \quad (32)$$

$$\Delta T_{me} = \frac{(T_{ceg} - T_{10}) - (T_{ceç} - T_9)}{\ln \frac{T_{ceg} - T_{10}}{T_{ceç} - T_9}} \quad (33)$$

$$\Delta T_{meş} = \frac{(T_4 - T_3) - (T_5 - T_2)}{\ln \frac{T_4 - T_3}{T_5 - T_2}} \quad (34)$$

UF değerleri de Eşitlik (35-39)’daki gibi hesaplanırlar.

$$UF_a = \frac{\dot{Q}_a}{\Delta T_{ma}} \quad (35)$$

$$UF_k = \frac{\dot{Q}_k}{\Delta T_{mk}} \quad (36)$$

$$UF_e = \frac{\dot{Q}_e}{\Delta T_{me}} \quad (37)$$

$$UF_g = \frac{\dot{Q}_g}{\Delta T_{mg}} \quad (38)$$

$$UF_{eş} = \frac{\dot{Q}_g}{\Delta T_{meş}} \quad (39)$$

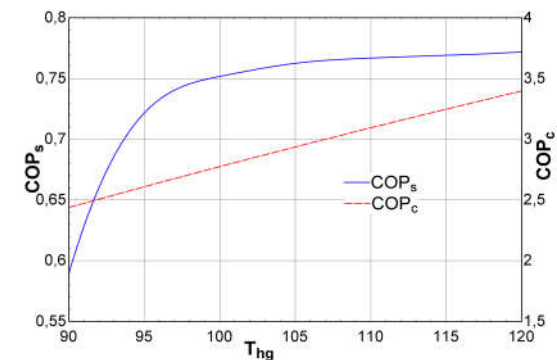
Çizelge 1’de eşanjör analizi için hesaplamalarda kullanılan parametreler verilmiştir.

**Çizelge 1.** Eşanjör hesabı için verilen değerler

$\dot{Q}_e = 50 \text{ kW}$	$T_{hg} = 90$
$\dot{M}_{wh} = 2,5$	$T_{ckg} = 31$
$\dot{M}_{ca} = 2,5$	$T_{cag} = 31$
$\dot{M}_{ce} = 2,5$	$T_{ceg} = 12$
$\dot{M}_{ck} = 2,5$	$T_{ceç} = 8$
$\eta_p = 0,7$	$\epsilon_e = 0,7$

#### 5. SAYISAL SONUÇLAR

Örnek sayısal sonuçlar için soğutma kapasitesi  $\dot{Q}_e = 50 \text{ kW}$ , soğutma suyu ve soğutulacak su debileri de  $2,5 \text{ kg/s}$  alınarak hesaplar yapılmıştır. Eşanjör etkinliği ve pompa verimi %70 olarak kabul edilmiştir. Bu durumda sıcak su giriş, soğutma suyu giriş ve soğutulacak su giriş sıcaklıkları değiştirilerek COP’lerin değişimi Şekil 2, 3 ve 4’te verilmiştir.

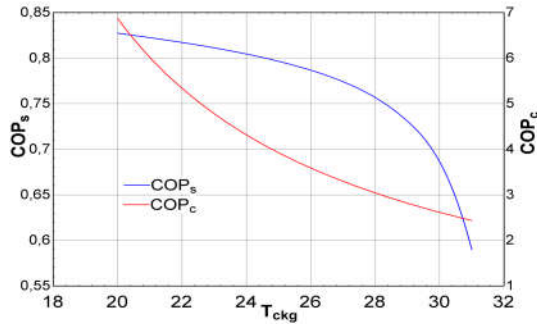


**Şekil 2.** COP’lerin  $T_{hg}$  ile değişimi

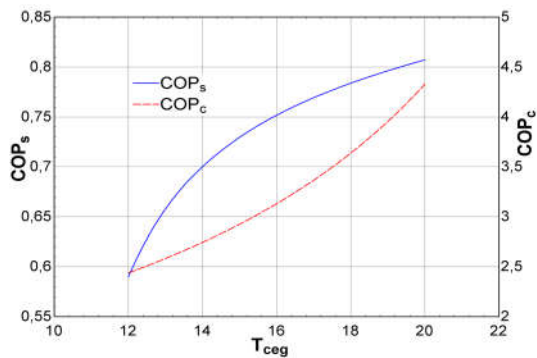


Şekil 2’de COP değerlerinin jeneratöre giren sıcak su sıcaklığı  $T_{hg}$ ’ye bağlı değişimi  $T_{ckg}=31$  °C ve  $T_{ceg}=12$  °C için gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi,  $COP_s$  90 °C den sonra hızla artmakta ve 100 °C den sonra da bu artış yavaşlamaktadır. Buna karşın  $COP_c$ ’nin doğrusal bir şekilde arttığı görülmektedir.

Şekil 3’te COP’lerin evaporatöre giren soğutma suyu sıcaklığına bağlı değişimi  $T_{hg}=90$  °C ve  $T_{ceg}=12$  °C için verilmiştir. Burada kondenser ve absorberin soğutması için kullanılan soğutma suyunun sıcaklığı düşürüldüğünde  $COP_s$  ve  $COP_c$ ’nin arttığı açıkça görülmektedir.  $COP_s$  yüksek sıcaklıklarda daha hızlı değişirken  $COP_c$  düşük sıcaklıklarda bu hızlı davranışı sergilemektedir. Bu değişim  $COP_s$  için %40,27 iken  $COP_c$  için %181,79 mertebesindedir.



Şekil 3. COP’lerin  $T_{ckg}$  ile değişimi



Şekil 4. COP’lerin  $T_{ceg}$  ile değişimi

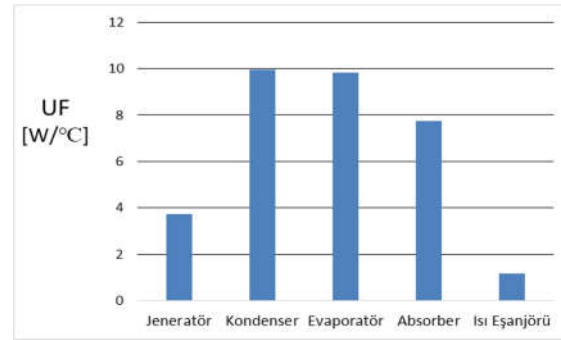
Şekil 4’te ise evaporatörde soğutulacak su giriş sıcaklığının  $COP$ ’ye etkisi  $T_{ckg}=31$  °C ve

$T_{hg}=90$  °C için gösterilmiştir. Buradan görüleceği gibi  $COP_s$ , soğutulacak su sıcaklığı arttıkça önce hızlı daha sonra da daha yavaş şekilde artmakta iken  $COP_c$  bunun tersi bir artış göstermektedir. Bu artış  $COP_s$  için %36,86 iken  $COP_c$  için %77,56’tür. Her üç şekil karşılaştırıldığında  $COP$ ’yi en çok etkileyen parametrenin evaporatör sıcaklığı olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. Cihazların  $\dot{Q}$  ve  $\Delta T_m$  değerleri

Cihaz	$\dot{Q}$ [kW]	$\Delta T_m$ [°C]
Jeneratör	67.41	18.05
Kondenser	51.36	5.164
Evaporatör	50.00	5.098
Absorber	66.05	8.518
Isı Eşanjörü	19.47	16.54

Çizelge 1’deki verilere göre belirlenen  $\Delta T_m$  ve UF değerleri Çizelge 2’de tüm cihazlar için verilmiştir. Burada en yüksek ısı transferinin jeneratör ve absorberde olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5’te ise bu verilerden türetilen UF değerleri verilmiştir. Bu değerler jeneratör, kondenser, evaporatör, absorber ve ısı eşanjörü için sırasıyla 3,735, 9,947, 9,808, 7,754 ve 1,177  $W/°C$ ’dir.



Şekil 5. Cihazların UF değerleri

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada LiBr-Su çözeltisinin akışkan olarak kullanıldığı bir absorpsiyonlu soğutma makinesinin simülasyonu yapılmış ve sistemin tüm parametreleri ile sistemin soğutma etkinliği  $COP_s$  ile karnot etkinliği  $COP_c$ ’nin değişimi hesaplanmıştır. Çalışmada, sistemin soğutma

etkinliklerinin sıcak su, soğutma suyu ve soğutulacak su sıcaklıklarından nasıl etkilendiği şekillerle açıklanmıştır. Ayrıca sistemdeki cihazların her birindeki UF değerleri bulunmuştur. Buradan şu sonuçlar çıkarılabilir.

- COPs jeneratörde kullanılan sıcak su sıcaklığı  $T_{hg}$  ve evaporatörde kullanılan soğutma suyu  $T_{ceg}$  ile artmakta, kondenserde kullanılan soğutulacak su  $T_{ckg}$  ile azalmaktadır.  $COP_c$  ise  $T_{hg}$  ve  $T_{ceg}$  ile artmakta  $T_{ckg}$  ile azalmaktadır.
- Jeneratörde kullanılan sıcak su sıcaklığı  $T_{hg}$  90 °C'den 105 °C'ye çıkarken COPs artışı %29,3 iken, 105 °C'den 120 °C'ye çıkarken bu artış %1,23 olmaktadır.
- Kondenserde kullanılan su sıcaklığı  $T_{ckg}$  21 °C'den 26 °C'ye çıkarken COPs'deki düşüş %4,35 iken, 26 °C'den 31 °C'ye çıkarken bu düşüş büyüme ve %25 seviyelerine ulaşmaktadır.
- Evaporatörde kullanılan soğutma suyu sıcaklığı  $T_{ceg}$  12 °C'den 16 °C'ye çıkarken COPs artışı %27,5 iken, 16 °C'den 20 °C'ye çıkarken bu artış %7,6 olmaktadır.
- En yüksek UF değerinin kondenserde olduğu tespit edilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Balaras, C.A., Grossman G., Henning, H.M., Ferreira, C.A.I., Podesser, E., Wang, L., Wiemken, E., 2007. Solar Air Conditioning in European Overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 299–314.
2. Galindo, J., Dolz, V., García-Cuevas, L.M., Ponce-Mora, A., 2020. Numerical Evaluation of a Solar-Assisted Jet-Ejector Refrigeration System: Screening of Environmentally Friendly Refrigerants. *Energy Conversion and Management*. 210, 112681.
3. Çanka, F., 2015. Solar Energy, its Recent Status in Turkey and Production Technologies, *Mühendis ve Makina*, 56(671), 28-40.
4. Kim, D.S., Infante Ferreira, C.A., 2008. Solar Refrigeration Options-a State-of-the-art Review, *International Journal of Refrigeration*, 31(1), 3–15.
5. Li, Z., Sumathy, K., 2000. Technology Development in the Solar Absorption air-Conditioning Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(3), 267–293.
6. Lamp, P., Ziegler, F., 1998. European Research on Solar-Assisted Air Conditioning, *International Journal of Refrigeration*, 21(2), 89-99.
7. Grossman, G., 2002. Solar-Powered Systems for Cooling, Dehumidification and Air-Conditioning, *Solar Energy*, 72(1), 53–62.
8. Pridasawas, W., 2006. Solar-Driven Refrigeration Systems with Focus on the Ejector Cycle, PhD Thesis, Royal Institute of Technology.
9. Tesha, T.P., 2009. Absorption Refrigeration System as an Integrated Condenser Cooling Unit in Geothermal Power Plant. *Proceedings World Geothermal Congress*, MSc Thesis, Department of Mechanical and Industrial Engineering.
10. Büyükalaca, O., Yılmaz, T., 2003. Güneş Enerjisi ile Soğutma Teknolojilerine Genel bir Bakış, *Tesisat Mühendisliği*, 45–56.
11. ASHRAE Handbook: Fundamentals. Thermodynamics and Refrigeration Cycles, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2009.
12. Klein, S.A., Nellis, G., 2012. *Thermodynamics*, Cambridge University Press.
13. Florides, G.A., Kalogirou, S.A., Tassou, S.A. Wrobel, L.C., 2003. Design and Construction of a LiBr–Water Absorption Machine, *Energy Conversion and Management*, 44(15), 2483-2508.
14. Herold, K.E., Radermacher, R., Klein, S.A., 2016. *Absorption Chillers and Heat Pumps*, 2nd ed. United Kingdom: Boca Raton, FL, CRC Press, Taylor & Francis Group.
15. Martinho, L.C.S., Vargas, J.V.C. Balmant, W., Ordonez, J.C. 2016. A Single Stage Absorption Refrigeration System Dynamic Mathematical Modeling, Adjustment and Experimental Validation, *Int. J. Refrig.* 68, 130–144.
16. Chen, W., Bai, Y., 2016. Thermal Performance of an Absorption-Refrigeration System with  $Cu_2Cl_2/NH_3$  as Working Fluid, *Energy*, 112, 332–341.

17. Táboas, F., Bourouis, M., Vallès, M., 2014. Analysis of Ammonia/Water and Ammonia/Salt Mixture Absorption Cycles for Refrigeration Purposes in Fishing Ships, *Applied Thermal Engineering*, 66 (1-2), 603-611.
18. Chen, Y., Han, W., Jin, H., 2016. Thermodynamic Performance Optimization of the Absorption-Generation Process in an Absorption Refrigeration Cycle, *Energy Conversion Management*, 126, 290-301.
19. Farshi L.G., Mosaffa, A.H., Infante Ferreira, C.A., Rosen, M.A., 2014. Thermodynamic Analysis and Comparison of Combined Ejector-Absorption and Single Effect Absorption Refrigeration Systems, *Appl. Energy*, 133, 335-346.
20. Mohtaram S., Omidi M., Lin J., Sun, H., Chen, W., 2019. Exergy Analysis of a Multi Mixture Working Fluid Absorption Refrigeration Cycle, *Case Studies in Thermal Engineering*, 15, 100540.
21. Liang, X., Zhou, S., Deng, J., He, G., Cai, D. 2019. Thermodynamic Analysis of a Novel Combined Double Ejector-Absorption Refrigeration System using Ammonia/Salt Working Pairs without Mechanical Pumps, *Energy*, 185, 895-909.
22. Cai, D., Jiang, J., He, G., Li, K., Niu, L., Xiao, R., 2016. Experimental Evaluation on Thermal Performance of an Air-Cooled Absorption Refrigeration Cycle with  $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$  and  $\text{NH}_3\text{-NaSCN}$  refrigerant Solutions, *Energy Conversion Management* 120, 32-43.
23. Ozgoren, M., Bilgili, M., Babayigit, O., 2012. Hourly Performance Prediction of Ammonia-water Solar Absorption Refrigeration, *Appl. Therm. Engineering*, 40, 80-90.
24. Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2006. *Thermodynamics an Engineering Approach*, McGraw-Hill, USA, 1-865.
25. Yılmaz, T., 2016. *Soğutma Teknolojisi*, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Ders Notları.
26. Yamankaradeniz, R., Horuz, İ., Coşkun, S., Kaynaklı, Ö., Yamankaradeniz, N., *Soğutma Tekniği ve Isı Pompası Uygulamaları*, 2017. Dora Basım Yayın, Bursa.



## Effect of Boundary Conditions on Natural Frequencies of Orthotropic-Cored Composite Sandwich Beams

Sefa YILDIRIM<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Alanya Alaaddin Keykubat University, Mechanical Engineering Department, Antalya

Geliş tarihi: 30.03.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Abstract

The influences of different boundary conditions on the free vibration behavior of sandwich beams having an orthotropic core have been investigated. The finite element codes used in the analysis are written via MATLAB and infused into ANSYS software package. The two-dimensional beam is considered to be made of an orthotropic core and two isotropic face sheets which may be homogeneous or heterogenous. The longitudinal dominated natural frequencies are considered and effects of core and face-sheet materials on the natural frequency are also studied. The results show that the order of the natural frequencies from highest to lowest, respectively, is clamped-clamped, clamped-simply supported, simply supported-simply supported and clamped-free for the orthotropic core composite beam. Also, using Al-TiB<sub>2</sub> instead of pure Al layer as well as the increasing the inhomogeneity index decreases the natural frequency.

**Keywords:** Vibration, Natural frequency, Boundary conditions, Composites beams, Orthotropy

### Sınır Şartlarının Ortotropik Çekirdekli Kompozit Sandviç Kirişlerinin Doğal Frekanslarına Olan Etkisi

### Öz

Değişik sınır şartlarının ortotropik çekirdek tabakaya sahip kompozit malzemeden yapılmış olan kirişlerin serbest titreşim davranışları üzerine olan etkisi incelenmiştir. Çözümlemede, sonlu elemanlar paket programı kullanılmış olup kodlar MATLAB ile yazılmıştır. İki boyutlu kirişin bir adet ortotropik çekirdekten oluştuğu ve yüzey tabakasının homojen ya da heterojen olduğu varsayılmıştır. Kiriş boyuna titreşimler dikkate alınmış olup çekirdek ve yüzey tabakalarının malzeme özelliklerinin doğal frekans üzerine etkisi de ayrıca çalışılmıştır. Sonuçlara göre doğal frekanslar yüksekten düşüğe doğru sırasıyla ankastre-ankastre, ankastre-basit mesnet, basit mesnet-basit mesnet ve ankastre-serbest olarak belirlenmiştir. Ayrıca, saf Al tabaka yerine Al-TiB<sub>2</sub> fonksiyonel derecelendirilmiş yüzey tabakası kullanmak ve inhomojenlik katsayısını artırmak doğal frekansını düşürmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Titreşim, Doğal frekans, Sınır şartları, Kompozit kirişler, Orthotropi

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sefa YILDIRIM, [sefa.yildirim@alanya.edu.tr](mailto:sefa.yildirim@alanya.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

The understanding of vibration behavior of sandwich beams is the important task for the scientists and structural engineers so that they may provide not only the good strength and less weight but also flexibility and thermal insulation.

The recent studies related to the natural frequency of composite beams will be cited hereafter. Salam and Bondok [1] have investigated free vibration behaviors of various sandwich beams such as beam having multi-layer core using finite-element. A novel finite element formulation for the natural frequency of sandwich beam is presented by Sudhakar et. al. [2] where the beam is assumed to be composed of rigid face sheets and flexible core. ANSYS finite-element code using Plane 82 element type is developed by Long et. al. [3] for the plane vibration of partially-cantilevered sandwich beams with soft core. Lou et. al. [4] have investigated the natural frequency of beam with steel face layers and pyramidal truss core. In this work, the beam is considered to be subjected to simply supported boundary conditions. Sabiha et. al. [5] are studied the free vibration of pinned-pinned beam made of steel core and thin composite face sheets. The free vibration response of lattice sandwich beam is analyzed by Lou et. al. [6] considering different boundary conditions where the lattice beam is transformed to homogeneous three-layered beam. Xu and Qiu [7] are presented a parametric study on the natural frequency of lattice-cored composite beam by using combine theory of Euler-Bernoulli and Timoshenko beam. In their work, the governing equation of motion of simply-supported beam is derived with the help of Hamilton's principle. Yang et. al. [8] have examined the plane free vibration of functionally-graded core beam via a mesh-free boundary-domain integral equation method. The composite face layered sandwich beam is analyzed by Tekili et. al. [9] in the terms of natural frequency where the finite-element is solution method. The free vibration of flexible core sandwich beam has been studied by Wang and Wang [10] using extended high-order sandwich panel theory under various boundary conditions. Bensahal and Amrane [11] have performed a finite element study on the free

vibration sandwich beam subjected to different boundary conditions. The natural frequencies of polymer honeycomb sandwich cantilever beam have been investigated by Cheng et. al. [12] via a refined sandwich beam theory. The free vibration study based on hyperbolic shear deformation theory is presented by Bouakkaz et. al. [13] where the beam is composed of functionally-graded face layers and isotropic homogenous core. Wang and Liang [14] have investigated the free vibration characteristics of flexible core symmetric sandwich beam using the combine theory of Euler-Bernoulli beam and two-dimensional elasticity. In their work, the primary solution method is harmonic quadrature method and the beam is studied under various so-called boundary conditions. Zhang et al. [15] are presented a finite element solution on the free vibration of honeycomb corrugated hybrid core composite beam. The natural frequency study of metal foam core composite beam is conducted by Wang and Zhao [16] using Chebyshev collocation method. Asgari et. al. [17] have examined the free vibration of three-layered sandwich beam with a flexible core using simply supported boundary conditions. The free vibration study of functionally-graded lattice core sandwich beam has been conducted by Xu et. al. [18] using Rayleigh-Ritz method. Sayyad and Avhad [19] are presented the natural frequency of sandwich beam using Navier's solution technique. In this study, the beam is made of functionally-graded face sheets and isotropic homogeneous core layer and subjected to simply supported boundary conditions. Erdurcan and Cunedioğlu [20] have studied the natural frequency of symmetric composite beam with an aluminum core and FGM face layers. In this work, a finite element solution is presented and layerwise model is used to represent the graded behavior of FGM face layers.

The study performed in this paper is to examine the boundary effect on the free vibration characteristics of sandwich beam with two face sheets and a core. The face sheets may be homogeneous or heterogenous and the core is orthotropic. The study is carried out by assuming the two-dimensional beam problem. The laminates

are perfectly bonded to each other meaning that there is no delamination. The beam is considered to be subjected to various boundary conditions as clamped-clamped (C-C), clamped-free (C-F), clamped-simply supported (C-S) and fully simply supported (S-S).

## 2. BEAM AND MATERIAL MODELS

A composite core sandwich beam having a rectangular cross-section is subjected to plane-stress conditions in the x-z plane with length L and depth h. The cartesian coordinate system is oriented to the bottom of the left-end of the beam where the axial coordinate is x and transverse coordinate is z. For the sake of simplicity and preventing the redundancy, the beam geometry is taken as constant where the depth is 0.125 mm and the length is 0.5 mm. The bottom and face layer are identical to each other and the thicknesses of face layer and core are 25 mm and 75 mm, respectively. Two main cases are considered for beam model. The face layer materials are isotropic homogeneous and functionally-graded (FG) for the first and second cases, respectively. In the analysis, Aluminum is selected as the isotropic face sheet material and two different materials as Graphite/Epoxy and Boron/ Epoxy for orthotropic core are considered. The mixture of Aluminum and Titanium Diboride is used for FGM face layers where the bottom of face layer is Aluminum graded smoothly to Titanium Diboride through the top of face layer. The material properties used in this paper are tabulated in Table 1.

The material model obeying the power-law function for the FGM face sheets are given as follows:

$$P(z) = P_b + (P_t - P_b) \left( \frac{z}{h} \right)^\lambda \quad (1)$$

where  $P$  is the effective material property, namely, Young's Modulus  $E$ , Poisson's ratio  $\nu$  and density  $\rho$ ,  $b$  and  $t$ , respectively, denote the bottom and top of the face sheet and  $\lambda$  is the inhomogeneity index which is a positive constant.

**Table 1.** Elastic properties of the material used in the analysis

	Graphite/ Epoxy	Boron/ Epoxy	Aluminum (Al)	Titanium Diboride (TiB <sub>2</sub> )
$E_1$ (GPa)	181	200	70	575
$E_2=E_3$ (GPa)	10.3	19.6	70	575
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0.28	0.28	0.3	0.15
$\nu_{23}$	0.6	0.3	-	-
$G_{12}=G_{13}$ (GPa)	7.17	7.2	-	-
$G_{23}$ (GPa)	3	5.5	-	-
$\rho$ (kg / m <sup>3</sup> )	1600	1967	2707	4520

The FEM model are coded by using MATLAB and implemented to ANSYS Mechanical APDL. The selected element type is PLANE183 which is two-dimensional structural solid element defined by eight-node. The element has two degrees of freedom at each node as translations in the nodal x and z directions. Also, the different element type can be selected to successfully modeling the beam [21]. The FGM behavior for the second case is obtained by slicing the face sheets into numerous homogeneous pieces along the axial coordinate where each slice has constant but different material properties. The nodes are coincident at the interface regions to secure the integrity of beam. The numbers of elements, respectively, are 4200 and 6000 for isotropic and FGM face sheets beams. The number of slices for the FGM face sheets to emulate the graded property of material is defined as 40 where increasing the number of slices does not affect the accuracy considerably but affects the burden of computation. For each case, the beam is investigated under four different boundary conditions as depicted in Figure 1.

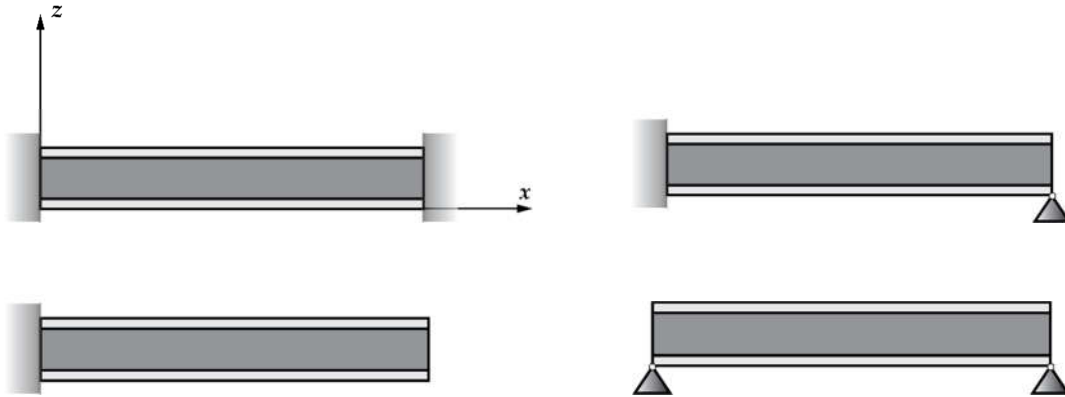


Figure 1. Illustration of composite beam under different boundary conditions

### 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The validation of three-layered finite element model is acquired by using the data available in literature. In the validation study, the layers of beam are assumed to be made of pure Al and subjected to simply supported boundary conditions. The results are compared with the natural frequencies given by Li [22] for the homogeneous Al beam and a very good agreement is obtained. The validation study results are given in Table 2 where  $m$  denotes the wave number. The first five fundamental natural frequencies of Al-Glass/Epoxy-Al beam are tabulated in Table 3 where the C-C boundary condition results in highest frequency values. The effects of FGM face sheets and boundary conditions are given in Table 4. It is seen that using graded face layer increases the natural frequency of the orthotropic core beam. In Table 5, the influence of inhomogeneity index can be observed. The natural frequencies for all cases decrease with the increase of inhomogeneity index. As, the trend for the

natural frequencies is the same with the Glass/Epoxy core case, only the first fundamental frequency is taken into consideration for Boron/Epoxy core beam which prevents the redundancy for the reader. The results for the Boron/Epoxy case are given in Table 6 and it is observed that using Boron/Epoxy as a core material decreases the natural frequencies. Consequently, the order of natural frequencies from highest to lowest with respect to boundary conditions are C-C, C-S, S-S and C-F, respectively.

Table 2. Comparison of the results with literature for the first 5 natural frequencies (Hz)

$m$	This Study	Li [22]
1	1053.997959895	1052.9149908
2	3492.041736381	3486.1521552
3	6447.468518035	6430.2687291
4	9561.972670083	9527.8743302
5	12626.44457408	12658.3199622

Table 3. Natural frequencies of Al-Glass/Epoxy-Al composite beam for different boundary conditions

$m$	$\omega_n$			
	C-C	C-F	C-S	S-S
1	1621.296162008	463.6484272879	1363.991387480	1127.705119916
2	3362.649335465	1835.818179267	3197.462877353	3015.929317161
3	5404.302838372	3854.045838799	5221.238110579	5046.922626531
4	7535.117741474	5811.790574542	7366.585773778	7197.829387526
5	9809.631266040	7750.215737570	9637.367271987	9461.696688790



**Table 4.** Natural frequencies of FGM-Glass/Epoxy-FGM composite beam for different boundary conditions  $\lambda=1$ 

$m$	$\omega_n$			
	<i>C-C</i>	<i>C-F</i>	<i>C-S</i>	<i>S-S</i>
1	1882.903604933	641.1609583673	1632.093598501	1433.403188078
2	3963.162911916	2263.455927942	3723.514024429	3488.835152270
3	6430.193977916	4573.625396955	6100.484654716	5794.208113251
4	9147.499073626	6834.709799005	8780.381611912	8396.449820132
5	12136.35720605	9834.292198251	11731.52181127	11292.05341098

**Table 5.** Natural frequencies of FGM-Glass/Epoxy-FGM composite beam for different boundary conditions  $\lambda=2$ 

$m$	$\omega_n$			
	<i>C-C</i>	<i>C-F</i>	<i>C-S</i>	<i>S-S</i>
1	1837.819181339	606.7248083799	1589.132724125	1385.568392257
2	3827.818155314	2182.268202814	3624.857523086	3419.284134759
3	6150.939055781	4429.637909049	5880.258608840	5628.389164980
4	8619.021945353	6574.458352093	8363.451931928	8038.190823994
5	11358.17569294	9387.531766983	10999.30358935	10659.02576944

**Table 6.** First fundamental natural frequencies of Boron/Epoxy core composite beam for different boundary conditions

<i>Facesheet</i>	$\omega_n$			
	<i>C-C</i>	<i>C-F</i>	<i>C-S</i>	<i>S-S</i>
Al	1546.866190789	447.185668403	1303.898483274	1082.292414291
FGM $\lambda=1$	1810.093922841	616.3879408418	1567.726822992	1375.456043345
FGM $\lambda=2$	1762.054545988	582.4079302594	522.853006857	1327.121281490

#### 4. CONCLUSION

The influences of different boundary conditions on the longitudinal dominated free vibration behavior of three-layered composite beam are examined using finite-element software package. The finite-element codes are written by using MATLAB and implemented to ANSYS Mechanical APDL. The beam with a core having an orthotropic property is assumed to be two-dimensional on the  $x-z$  plane. It is obtained that the C-C boundary condition leads to highest natural frequency values whereas the C-F boundary condition gives the lowest ones. The effects of face layer material as well as the core material also considered. The replacing pure Al face layer with Al-TiB<sub>2</sub> graded face layer and using Boron/Epoxy core instead of Glass/Epoxy decreases the natural frequency for all boundary conditions.

#### 5. REFERENCES

1. Abdel Salam, M., Bondok, N.E., 2010. Free Vibration Characteristics for Different Configurations of Sandwich Beams. *International Journal of Mechanical and Mechanics Engineering*, 10(3), 41-54.
2. Sudhakar, V., Vijayaraju, K., Gopalakrishnan, S., 2010. Development of a New Finite Element for the Analysis of Sandwich Beams With Soft Core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 12(6), 649-683.
3. Long, R., Barry, O., Oguamanam, D.C.D., 2012. Finite Element Free Vibration Analysis of Soft-Core Sandwich Beams. *AIAA Journal*, 50(1), 235-238.

4. Lou, J., Ma, L., Wu, L.Z., 2012. Free Vibration Analysis of Simply Supported Sandwich Beams With Lattice Truss Core. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 177(19), 1712-1716.
5. Sabiha, T., Youcef, K., Bachir, M., 2013. Free Vibration Analysis of the Strengthened Beams By Composite Coats, in *Advanced Materials Research*. 595-599.
6. Lou, J., Wang, B., Ma, L., Wu, L., 2013. Free Vibration Analysis of Lattice Sandwich Beams Under Several Typical Boundary Conditions. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 26(5), 458-467.
7. Xu, M., Qiu, Z., 2013. Free Vibration Analysis and Optimization of Composite Lattice Truss Core Sandwich Beams with Interval Parameters. *Composite Structures*, 106, 85-95.
8. Yang, Y., Lam, C.C., Kou, K.P., Iu, V.P., 2014. Free Vibration Analysis of the Functionally Graded Sandwich Beams by a Meshfree Boundary-domain Integral Equation Method. *Composite Structures*, 117, 32-39.
9. Tekili, S., Khadri, Y., Merzoug, B., 2015. Finite Element Analysis of Free Vibration of Beams With Composite Coats. *Mechanika*, 21(4), 290-295.
10. Wang, Y., Wang, X., 2016. Free Vibration Analysis of Soft-core Sandwich Beams by the Novel Weak Form Quadrature Element Method. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 18(3), 294-320.
11. Bensahal, D., Amrane, M.N., 2016. Effects of Material and Geometrical Parameters on the Free Vibration of Sandwich Beams. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 29(2), 222-228.
12. Cheng, S., Qiao, P., Chen, F., Fan, W., 2016. Free Vibration Analysis of Fiber-reinforced Polymer Honeycomb Sandwich Beams With a Refined Sandwich Beam Theory. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 18(2), 242-260.
13. Bouakkaz, K., Lazreg, H., Zouatnia, N., Bedia, E.A., 2016. An Analytical Method for Free Vibration Analysis of Functionally Graded Sandwich Beams. *Wind and Structures, An International Journal*, 23(1), 59-73.
14. Wang, X., Liang, X., 2017. Free Vibration of Soft-core Sandwich Panels With General Boundary Conditions by Harmonic Quadrature Element Method. *Thin-Walled Structures*, 113, 253-261.
15. Zhang, Z.J., Han, B., Zhang, Q.C., Jin, F., 2017. Free Vibration Analysis of Sandwich Beams with Honeycomb-corrugation Hybrid Cores. *Composite Structures*, 171, 335-344.
16. Wang, Y.Q., Zhao, H.L., 2019. Free Vibration Analysis of Metal Foam Core Sandwich Beams on Elastic Foundation Using Chebyshev Collocation Method. *Archive of Applied Mechanics*, 89(11), 2335-2349.
17. Asgari, G., Payganeh, G., Fard, K.M., 2019. Dynamic Instability and Free Vibration Behavior of Three-layered Soft-cored Sandwich Beams on Nonlinear Elastic Foundations. *Structural Engineering and Mechanics*, 72(4), 525-540.
18. Xu, G.D., Zeng, T., Cheng, S., Wang, X.H., Zhang, K., 2019. Free Vibration of Composite Sandwich Beam with Graded Corrugated Lattice Core. *Composite Structures*, 229.
19. Sayyad, A.S., Avhad, P.V., 2019. On Static Bending, Elastic Buckling and Free Vibration Analysis of Symmetric Functionally Graded Sandwich Beams. *Journal of Solid Mechanics*, 11(1), 166-180.
20. Erdurcan, E.F., Cunedioğlu, Y., 2019. Free Vibration Analysis of a Functionally Graded Material Coated Aluminum Beam. *AIAA Journal*, 58(2), 949-954.
21. Temel, B., Noori, A.R., 2019. Transient Analysis of Laminated Composite Parabolic Arches of Uniform Thickness. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 47(5), 546-554.
22. Li, X.F., 2008. A Unified Approach for Analyzing Static and Dynamic Behaviors of Functionally Graded Timoshenko and Euler-Bernoulli Beams. *Journal of Sound and Vibration*, 318(4-5), 1210-1229.

## Şevli Yapılarda Jeoteknik Ölçüm ve Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi (Şişli-İstanbul)

Veli KESKİN<sup>1</sup>, Sedat TÜRKMEN\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 28.02.2020 Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Bu çalışma, İstanbul İli Şişli İlçesi, Cumhuriyet Mahallesi, 144 pafta, 994 Ada, 14 parsel üzerinde yer alan çok katlı bir yapının derin temel kazısı sırasındaki jeoteknik ölçümleri içermektedir. Çalışmanın amacı, derin temel kazı çalışmalarının kontrollü sürdürülmesinde farklı ölçüm disiplinine sahip jeoteknik ölçüm aletlerinin birlikte kullanılarak, olası şev hareketlerinin ciddi boyutlara ulaşmadan saptanmasıdır. Proje kapsamında açılan sondajlarla kazı öncesi zemin hakkında bilgi elde edilmiş ve bu bilgilere göre güvenli kazı için gerekli jeoteknik ölçüm aletleri belirlenmiştir. Kazı çalışmaları başlatılmadan önce oluşacak şev yüzeyleri dikkate alınarak çalışma alanı E1kesiti ile başlayan ve E14 kesiti ile sonlanan enine kesitlere ayrılmıştır. Ayrılan her bir kesit üzerinde genişlik ve kazı derinliği dikkate alınarak jeoteknik ölçüm aleti yerleştirilmesi planlanmıştır. Çalışma alanında kazı derinliğinin en fazla olduğu kesitler E1, E2 ve E3 kesitleridir. Kazı çalışmalarına öncelikle kritik olarak görülen E1, E2 ve E3 kesit güzergahında başlanmıştır. Kazı esnasında zeminde meydana gelebilecek yatay yer değiştirmeleri saptamak amacıyla yapı yaklaşım sınırı göz önünde bulundurularak, E1 kesiti için şev gerisi ve kazık arkası olmak üzere derinlikleri 52 m ile 48 m olan inklinometre boruları yerleştirilmiştir. Aynı sistemle E2 kesiti için 47,5 m, 39 m, E3 kesiti için 42 ve 35 m'lik inklinometre boruları yerleştirilmiştir. Yapılan inklinometre ölçümleri sonucuna göre ölçülen maksimum yer değiştirmeler E1 kesiti için 48 mm E2 kesiti için 55 mm ve E3 kesiti için 27,5 mm olarak ölçülmüştür. Çalışmalar yürütülürken şev duraylılığını sağlamak için iksa sistemleri kullanılmıştır. İksa sistemlerinin hareketliliklerini ölçmek amacıyla kuşak yapılarına her üç kesit için her 3 metre de bir adet 100 ton kapasiteli toplamda 39 adet yük hücresi yerleştirilerek iksa sistemlerindeki yük artışları ölçülmüştür. Kesitlerde ölçülen en büyük yük artışı E2 kesitinde 12,45 kN (1.245 ton) olarak ölçülmüştür. Yatay hareketliliği ölçmek amacıyla E1, E2 ve E3 kesitlerine 14 adet ekstansometre yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlerle ölçülen en büyük yer değiştirme E2 kesitinde 4 mm olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değer kesit için risk teşkil etmemiştir. Düşey yer değiştirmeleri ölçmek amacıyla üç kesite birer adet çok sensörlü manyetik oturma kolonu yerleştirilerek ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucu ciddi bir oturma gözlenmemiştir. Yapılan kazı çalışması boyunca risk teşkil edecek kütle hareketi E4 ve E5 kesitlerinde gözlemlenmiştir. Kazı derinliğinin 15,2 m ile 9,4 m arasında değişen bu kesitlerde kazı yönünde ciddi bir yer değiştirme tespit edilmiştir. Hareketin başlıca sebebi yüzey sularına bağlı ayrılmış birimler içindeki iksaların zemine tutunamaması olarak belirlenmiştir. Ölçülen maksimum yer değiştirmeler ise inklinometre ölçümlerinde E4 kesitinde 30 mm, E5 kesitinde ise 21,5 mm olarak ölçülmüştür. Kesitlere yerleştirilen yük hücresi ölçüm değerlerine göre meydana gelen yük artışları E4 kesitinde 26,38 kN (2,638 ton), E5 kesitinde ise 23,13 kN (2,313 ton) ölçülmüştür. Saptanan aşırı yer değiştirmeler dikkate alınarak bu kesitlerde iksa destek sistemleri güçlendirilerek hareket miktarı kontrol altına alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Jeoteknik ölçüm, Aletsel izleme, Eğimli kazılar, İstanbul, Şişli

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Sedat TÜRKMEN, [sturkmen@cu.edu.tr](mailto:sturkmen@cu.edu.tr)

## **Geotechnical Measurement and Evaluation of Measurement Data in Slope Structures (Şişli-İstanbul)**

### **Abstract**

This study included the geotechnical measurements used throughout the deep foundation excavation of a multi-storey building located on Şişli district, Cumhuriyet District, 144 map, 994 Island and 14 plat in Istanbul. The purpose of the study is to identify possible extreme slope movements before reaching serious dimensions using geotechnical measuring instruments with different measuring disciplines together in the controlled continuation of deep foundation excavation works. The information about the soil before excavation was obtained with drilling within the scope of the project. Hence, the necessary geotechnical measurement tools for safe excavation were determined according to the information obtained. The study area divided into cross sections starting with E1 and ending with E14 considering the slope surfaces that may occur before the excavation works start. It was planned to place the geotechnical measurement tools onto each divided sections considering the width and excavation depth. The excavation depths were greatest for E1, E2 and E3 cross sections. Initially, the excavations have started along these sections accepted as critical ones. In order to determine the horizontal displacements that may occur on the ground during the excavation, inclinometer pipes have been placed for sections including the back of the slope and the back of the pile considering the construction approach limit. The pipes were with a depth of 52 m to 48 m for E1 cross section, 47.5 m and 39 m for E2 cross section, and 42 m and 35 m for E3 cross section. The inclinometer measurements showed that the maximum displacement measures observed were 48 mm for E1, 55 mm for E2 and 27.5 mm for E3. Retaining systems were used to ensure the slope stability through the study. Load increases in the retaining systems were measured using load cells a capacity of 100 tons for each one and a total number of 39 placed in every 3 meters for each three sections. The greatest increase was measured as 12.45kN (1.245ton) in cross section E2. In order to measure the horizontal mobility, measurements were made by placing 14 extensometers in cross sections E1, E2 and E3. The largest displacement measured was observed as 4mm in the E2 section. This measured value did not pose a risk for the section. In order to measure the vertical displacements, a multisensor magnetic settlement column was placed in three cross sections and measurements were taken. No serious settlement was observed as a result of the measurements. The mass movement which could pose a risk during the excavation work was observed in cross sections E4 and E5. A serious displacement in the direction of excavation was detected in these sections that the depth of excavation varies between 15.2 and 9.4. The main reason for the movement has been determined as the inability of the support systems in the weathered units to adhesion to the soil. The maximum displacements were measured as 30 mm in the E4 cross section and 21.5mm in the E5 cross section. Load increases according to the load cell measurement values placed in the sections were measured as 26.38 kN (2.638 tons) in the E4 cross section and 23.13kN (2.313 tons) in the E5 cross section. Taking into consideration the excessive displacements detected, the support amount is strengthened in these sections and the amount of movement is taken under control.

**Keywords:** Geotechnical measurement, Instrumental monitoring, Slope excavations, İstanbul, Şişli

### **1. GİRİŞ**

Ülkemizde çok katlı yapılar ve bu yapılar için yapılan dik temel kazılarının yürütülmesinde jeoteknik izleme aletlerinin kullanılması oldukça yenidir. Bu tür yapıların temel boyutları büyük ve

derindir. Temel yapıları oluşturulurken çoğunlukla kontrolsüz ya da tek ölçüm yöntemi kullanılarak temel kazısı yapılmaktadır. Temel kazılarının kısa sürede bitirilip üst yapıya geçilmesi ve zaman kazanmak amacıyla hızlı ve kontrolsüz kazılar yaygındır. Yapılan hızlı kazı/taşma işlemleri

esnasında kazı alanının jeolojik ve fiziksel özellikleri göz ardı edildiği için kazı derinliği arttıkça teknik sorunlar baş göstermektedir. Bu belirtiler uzman kişi veya kişiler tarafından gözlenip ilgili ölçümlerin yapılmaması halinde stabilite sorunlarına bağlı ciddi kazalar meydana gelmektedir. Meydana gelebilecek en büyük sorun, uygun şev açısı verilmemiş kazı duvarlarının duraylılığını aşarak kütle hareketlerine sebep olmasıdır. Bununla birlikte yeraltı su seviyesi ölçümlerinin periyodik olarak yapılmaması, kütle hareketlerinin ana etkenlerinden biri olan su etkisinin göz ardı edilmesine sebep olmaktadır. Derin temel kazı işlemlerinin günümüz teknolojisi ve yerleştirilen çeşitli jeoteknik ölçüm aletleri aracılığı ile kontrollü ve minimum riskle yürütülmesi olasıdır. Bu ölçüm aletleri, kazı alanın jeolojik/jeoteknik özellikleri göz önüne alınarak uygun şev yüzeylerine veya şev gerisi kütleler içerisine uzman kişiler tarafından yerleştirilerek olası şev hareketlilikleri detaylı ölçülmektedir. Ülkemizin çeşitli bölgelerinde kütle hareketleri sonucu meydana gelen kazalar, derin kazılarda ve kütle hareketlerinin ölçülmesinde jeoteknik ölçümlerin ihmal edildiğini gözler önüne sermektedir. Yapılan bu çalışma derin kazı çalışmalarında şev hareketlerinin iki ve daha fazla hasas ölçüm aleti ile elektronik komutla eş zamanlı ölçülmesi verilerin internet yolu ile aktarılması açısından yurdumuzda benzeri projeler henüz yaygın değildir. Özaydın ve arkadaşları (2000) tarafından [1] bölgede yapılan bilimsel çalışma ile İstanbul ve yakın çevresinde Paleozoik yaşlı Trakya Formasyonu temel kayalar olarak çok geniş alanlarda incelenmiştir. Aletsel ölçümlü temel kazı çalışmaları bu formasyon içerisinde yürütülmüştür. Formasyon detaylı olarak incelendiğinde kumtaşı, silttaşı ve kiltaşından oluştuğu görülmüştür. Önceki çalışmalarda bu birim Trakya Formasyonu olarak adlandırılmıştır. Bu kırıntılı sedimanları yer yer andezit ve diyabaz daykları kesmektedir. Çalışma alanı içerisinde deformasyonlar belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu deformasyonlar sonucunda kıvrılma, kırılma ve değişik doğrultularda çatlak sistemlerinin geliştiği gözlenmiştir. Keskin [2] yaptığı Yüksek Lisans tezinde ve Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumunda derin kazı temellerinde şev duraylılığının aletsel ölçümü ve ölçüm

verilerinin değerlendirilmesi konusunu incelemiştir [3].

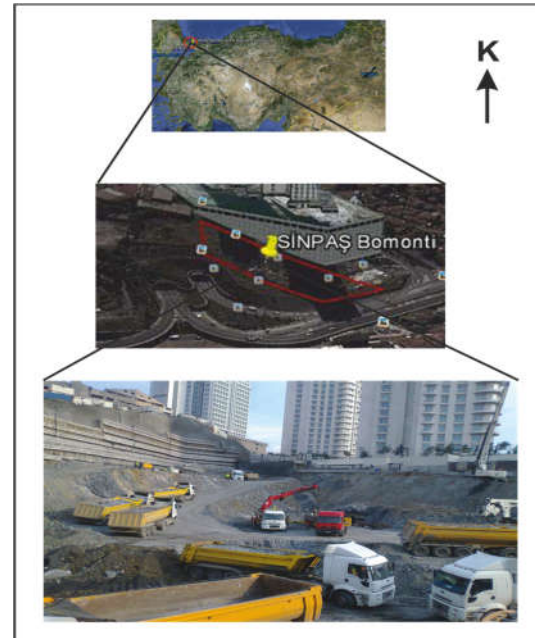
## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

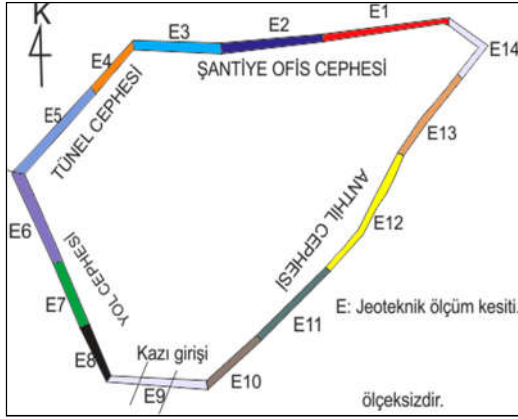
Bu çalışma, İstanbul ili Şişli ilçesi, Cumhuriyet Mahallesi, 144 pafta, 994 Ada, 14 parsel üzerinde yer alan çok katlı bir yapının derin temel kazısı jeoteknik ölçümleri boyunca sürdürülmüştür. Bu çalışma kapsamında kullanılan ölçüm aletleri ve bu aletlerden alınan jeoteknik ölçüm verileri değerlendirilmiştir.

Temel kazısı boyunca oluşturulan şevlerdeki hareketlilik, şev duraylılığı açısından çeşitli jeoteknik aletler kullanılarak ölçülmüştür.

Temel kazısı ve jeoteknik alet yerleşim çalışmaları 4 kazı cephesi şeklinde yürütülmüştür. Oluşturulan kazı cepheleri 14 kesite ayrılarak her kesite ölçüm almak için inklinometre, manyetik oturma kolonu, ekstansometre, yük hücresi ve piyezometre, yerleştirilmiştir. Çalışma alanının kazı cepheleri ve jeoteknik ölçüm kesitleri (Şekil 2)'de verilmiştir.



Şekil 1. Proje alanı ve çevresine ait yer bulduru

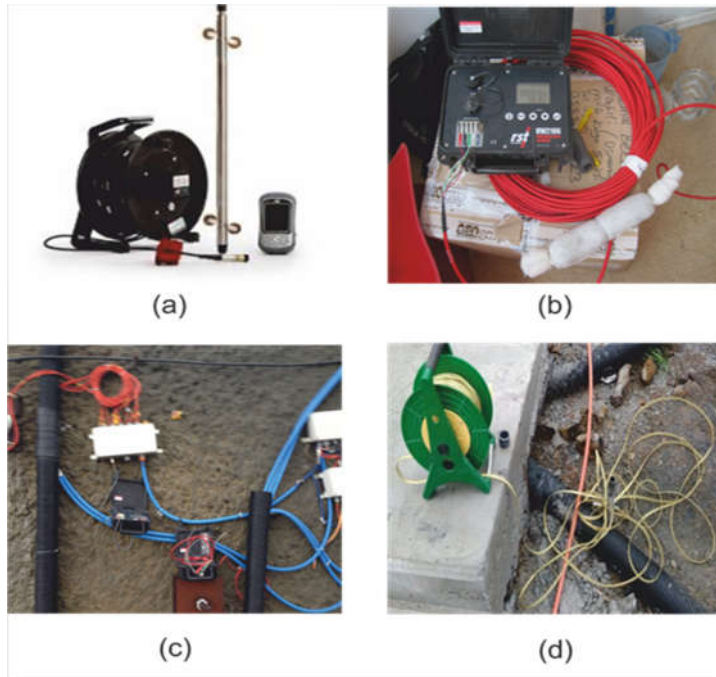


Şekil 2. Çalışma alanının kazı cepheleri ve jeoteknik ölçüm kesitleri

## 2.2. Metod

Proje kapsamında yerleştirilen jeoteknik ölçüm aletlerinden okuma almak için inklınometre kuyu okuma seti, piyezometre ve ekstansometre için vw2106 vibrating wire readout, yük hücresi için Sg350 readout, manyetik oturma kolonu ölçümü için düdüklü okuma aleti ve saha bilgisayarı cihazları kullanılmıştır [4] (Şekil 3a, 3b, 3c, 3d).

Projede yapılan çalışmalar arazi, laboratuvar ve büro olmak üzere 3 aşamada sürdürülmüştür.



Şekil 3. Inklınometre (a), Ekstansometre (b), Yük hücresi, (c), Piyezometre (d) Aletleri

Proje alanındaki zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla jeolojik ve jeoteknik etüt çalışmaları kapsamında derinlikleri 15-45.50 m arasında değişen, toplam derinliği ise 360.50 m olan 10 adet sondaj kuyusu açılmıştır. Alınan sondaj karotları üzerinde yapılan labatatuvar çalışmaları ile çalışma alanının zemin koşulları belirlenmiştir [5]. Sahada yerleştirilecek

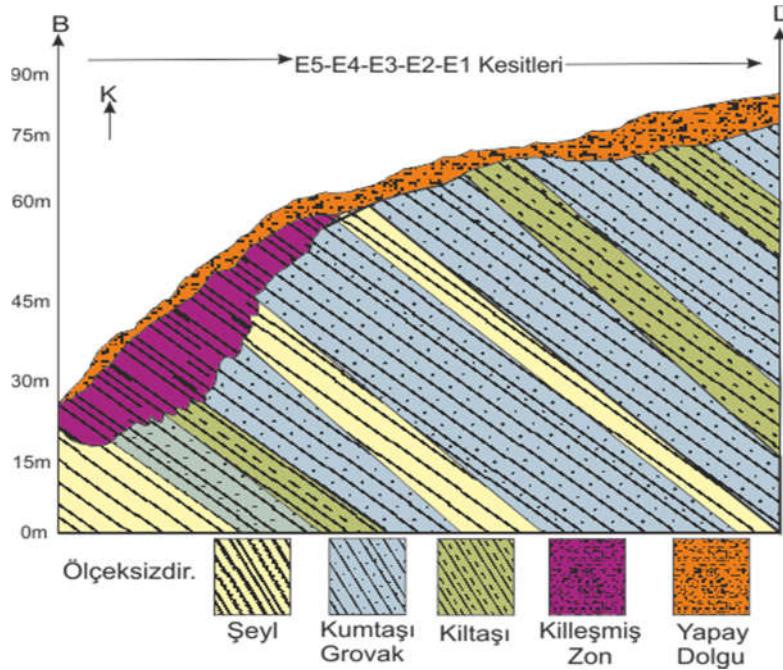
olan ölçüm aletleri, saha ölçülerine göre aletlerin yerleşim föyleri ve etiketleri laboratuvar ortamında hazırlanmıştır. Yük hücresi ve ekstansometre aletlerinin kablolama kaynak işleri laboratuvar ortamında yapılırken ekstansometre tijleri ve inklınometre borularının hazırlanması için geniş alanlara ihtiyaç olduğundan bu tür hazırlıklar sahada sürdürülmüştür. Büro çalışmaları

kapsamında arazi çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirilmiş, arazide alınan bilgisayar ölçümleri ve gözlemsel ölçüm değerleri, elektronik ortamlara aktarılmıştır. Bu datalar kullanılarak gerekli çizimler, grafikler ve diyagramlar yardımı ile verileri analizleri yapılmıştır.

### 3. PROJE ALANININ JEOLojİSİ

Proje kapsamında yapılan sondaja dayalı zemin ve temel etüt verilerine göre inceleme alanında en üstte 0-3 m arasında değişen dolgu birim, sonrasında Trakya formasyonuna ait ardalanmalı bir şekilde istiflenmiş şeyl, kumtaşı ve kıltaşı tabakaları incelenmiştir. Proje alanının

genelleştirilmiş enine kesiti (Şekil 4)'te verilmiştir. Tabakaların kalınlıkları saha genelinde farklılık göstermekte olup batı yönünde gidildikçe şeyl birimlerinin tabaka kalınlıkları artarken doğu yönünde ise kumtaşı tabaka kalınlıkları daha fazla gözlenmiştir. Sahanın batı kısmında yüzeylenden itibaren dolgu birimin altında yaklaşık 5 m kalınlığında kumtaşı birimi bulunmakta, bu tabakanın altında şeyl tabakası yer almaktadır. Şeyl tabakasının kalınlığı sahanın doğusuna doğru azalmaktadır. Bu bölgede tabakaları daha çok kumtaşları oluşturmaktadır. Bu birimler arasında kalınlığı değişkenlik gösteren kıltaşı tabakaları görülmektedir [1,2].

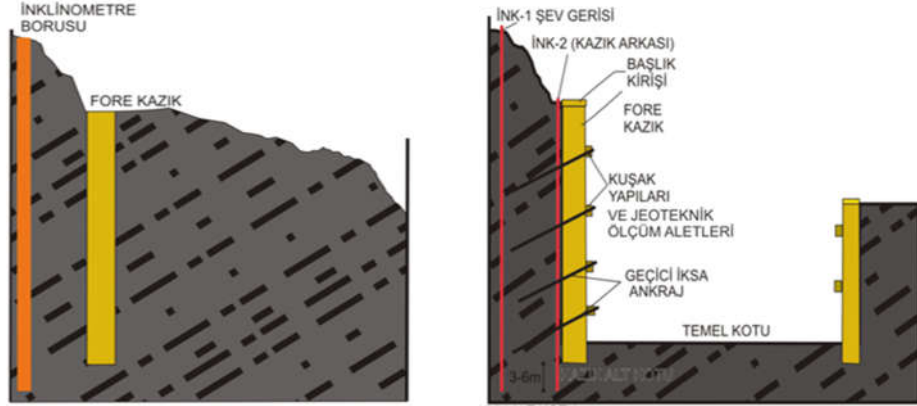


Şekil 4. Proje alanının genelleştirilmiş enine kesiti

#### 3.1. Jeoteknik Çalışmalar

Proje alanının bütün kesitlerine delgi yapılarak veya ankraj uçlarına yerleştirilmiş jeoteknik ölçüm aletleri yardımı ile kazı başlangıcından itibaren seviye seviye şev duraylılığı ölçülmüştür. Yerleştirilen her ölçüm aletinden yerleştirildiği tarihten itibaren periyodik deneysel ölçümler

yapılmıştır. Proje kapsamında yerleştirilen jeoteknik ölçüm aletlerine ait iksa yerleşim kesiti (Şekil 5)'te verilmiştir. Yapılan deneysel ölçümler düzenli olarak kayıt edilmiş artan kazı derinliği ve sayıca artan ölçüm cihazı verileri göz önüne alınarak kazı çalışmalarının kontrollü ilerletilmesi sağlanmıştır.



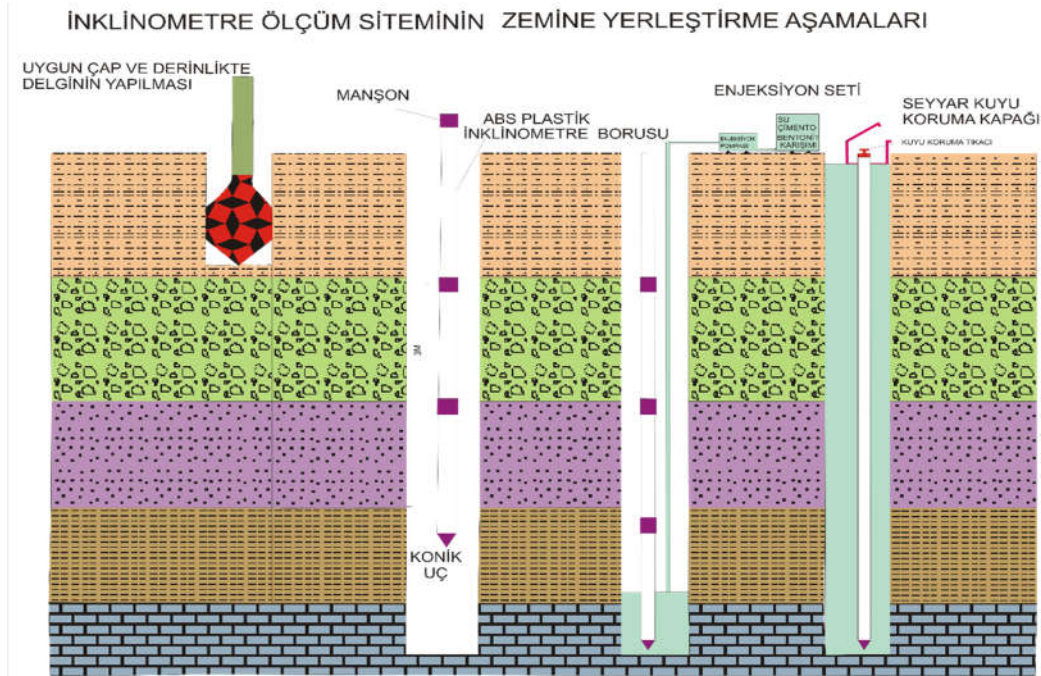
Şekil 5. Proje kapsamında yerleştirilen jeoteknik ölçüm aletlerinin iksa yerleşim kesitleri

#### 4. KULLANILAN JEOTEKNİK ÖLÇÜM ALETLERİ

##### 4.1. İnklinometre

Teknik bilimlerde eğim açısı ölçer olarak bilinen inklinometre zemin ve kaya kütlelerinde doğal olarak oluşan veya insan eliyle inşa edilen mühendislik yapılarına bağlı olarak meydana gelen

kütsel hareketlerin ölçülmesinde kullanılan bir ölçüm aletidir [6]. İnklinometre aleti kullanılarak sondaj kuyusuna yerleştirilen inklinometre boruları yardımı ile sondaj kuyusunun eksenine dik yönde meydana gelen yer değiştirme ölçülmekte hareketin yönü, miktarı ve hızı belirlenebilmektedir İnklinometre yerleşim kesiti (Şekil 6)'da verilmiştir.

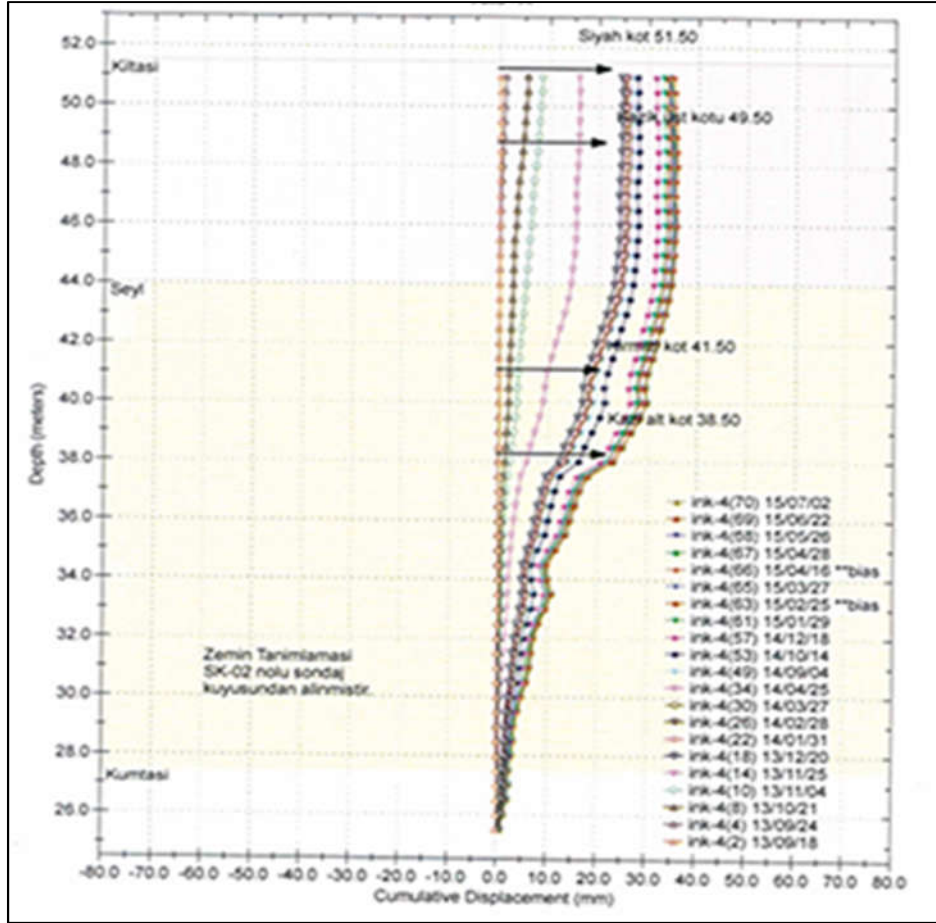


Şekil 6. İnklinometre yerleşim kesiti



Bir tek alet seti kullanılarak birden çok sondaj kuyusundan ölçüm alınabilmektedir. Ölçüm hassasiyeti diğer ölçüm aletlerinden daha yüksek olmasından dolayı zemin veya kaya kütlelerinde meydana gelen çok küçük hareketlilikler ölçülebilmektedir. Proje kapsamında şev gerisi ve

kazık arkası olmak üzere aynı kesite iki adet inklinometre yerleştirilerek, kazı derinliğine paralel meydana gelen kütle hareketliliği ölçülmüştür. Ölçüm grafiği olan kümülatif deplasman grafiği (Şekil 7)'de verilmiştir [2].



Şekil 7. Proje kapsamında yerleştirilen inklinometre verilerinden elde edilen kümülatif deplasman grafiği [2]

#### 4.2. Yük Hücresi

Yük hücreleri ankraj uçlarına veya herhangi bir yük artışının beklendiği yapılara belirli bir yükle sabitlenen ölçüm aleti çeşididir. Yük hücrelerinin ankraj uçlarına belirli yükler altında sabitlenmesi ile ilgili görsel (Şekil 8)'de verilmiştir. Ölçüm prensibi yük hücresi içerisinde yer alan gliserin sıvısı içerisindeki gergin yayın artan kütle

hareketliliğine bağlı olarak meydana gelen genlik değişimlerinin kN veya mv/v cinsinden ölçülmesi prensibine dayanır. Ölçümler (SG350 Readout) saha ölçüm cihazı kullanılarak alınmaktadır. (SG350 Readout) saha ölçüm cihazı şekil 9 da verilmiştir. Bu ölçümler ankrajlara gelen fazladan yükü belirlemek ve ya ankrajların yüklenip yüklenmediğiyle ilgili jeoteknik bilgi alınmasını sağlamaktadır. [2]



Şekil 8. Kriko kullanarak yük hücrelerinin ankraj uçlarına belirli yükler altında sabitlenmesi

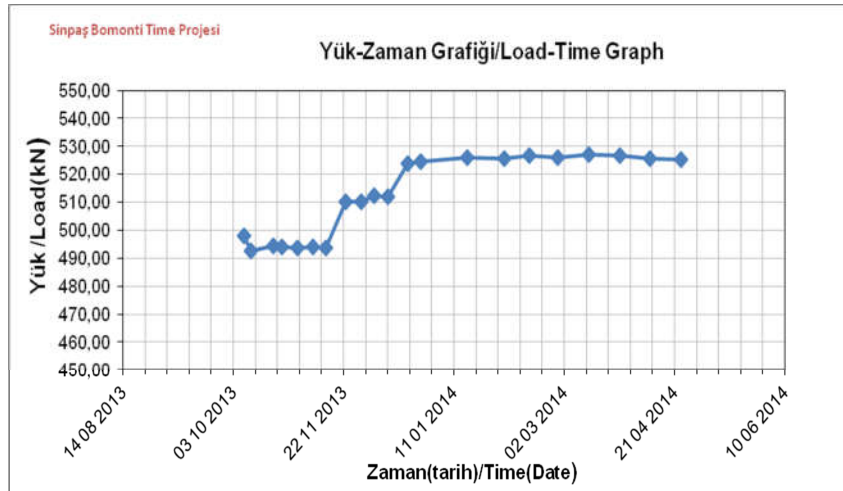
Yerleştirilen yük hücreleri zaman içerisinde yük artışı gözleniyorsa bu yük artışı ankraj sistemlerinin tutmuş olduğu şev gerisi zemin kütlelerinde hareketliliğin meydana geldiğini veya geleceğini belirtir. Yük hücrelerinde yük azalması gözleniyor ise bu durum ankraj enjeksiyonunun sorunlu olduğunu zemine tutturulmadığını gösterir [2]. Aynı kesite farklı kotlara yerleştirilmiş birden çok yük hücresinden elde edilen veriler analiz edilerek bir proje kazısı boyunca şev duraylılık

hakkında detaylı jeoteknik bilgi elde etmek mümkündür

Yük hücresi ölçüm verileri ile oluşturulmuş yük-zaman grafiği (Şekil 10)'da verilmiştir. Bu kapsamda proje alanında kazı kesitlerine yük hücreleri yerleştirilmiştir. Yük hücreleri kazı derinliğine paralel olarak oluşturulan fore kazık kuşakları içerisinde zemin içerisine enjeksiyonla tutturulmuş, ankraj uçlarına belirli yüklerle yerleştirilmiştir.



Şekil 9 Yük hücresi ölçüm aleti (SG350Readout)



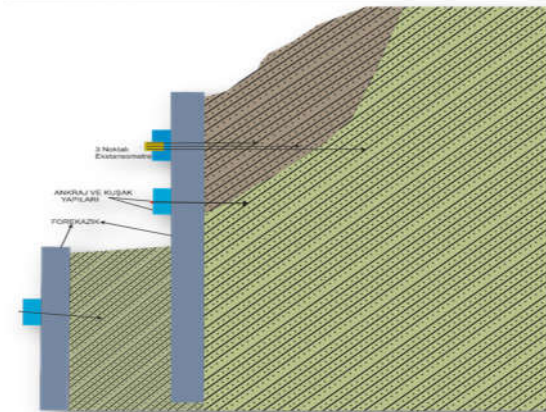
Şekil 10. Yük hücresi ölçüm verileri ile oluşturulmuş yük- zaman grafiği

### 4.3. Ekstansometre

Doğal şevler veya insan eliyle oluşturulmuş kazı şevlerinde olası kütle hareketini, kayan kütlelerin kayma yüzeyini, kayma yüzeyinin şev yüzeyinden olan yatay uzaklığının tespiti için kullanılan ölçüm aleti çeşididir (Şekil 11). Bu aletle kayma riski

taşıyan veya kontrollü şev kazılarında kontrol amaçlı yatay delgi ile zemin içerisine enjeksiyonla tutturulmuş tijler yardımı ile zeminde meydana gelebilecek kütle hareketleri ölçülmektedir. Kütle hareketi başladığında zemin içerisine tutturulmuş ekstansometre tijleri uzayarak veya kısalarak hareketlilik hakkında veri sağlamaktadır.

Ölçüm prensibi gerilme altında sensörün uzayıp kışalmasına bağlı olarak titreşim genliğinin değişmesidir. Okuma alınırken saha bilgisayarı ile ekstansometreye mv/v birimi ile enerji yollanarak, gerilerek incelen veya kısalarak kalınlaşan sensör titreştirilir. Kalınlaşan sensörün titreşimine harcanan enerji büyük iken incelen sensör için harcanan enerji daha az olmaktadır.



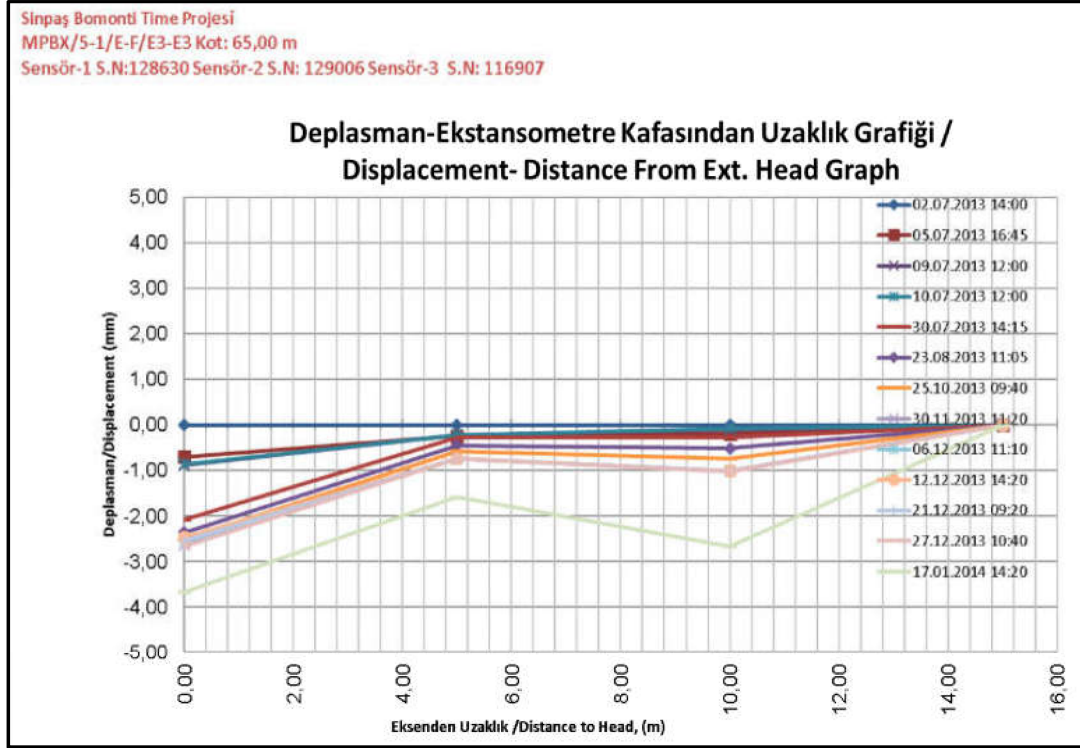
Şekil 11. Ektansometre yerleştirilmiş kazı yüzeyi ve yerleşim kesiti

Titreşim için harcanan enerji ölçülerek grafiklere aktarılarak mm cinsinden zemin hareketliliği hakkında jeoteknik veriler elde edilir. Yapılan ekstansometre ölçümlerine ait grafikler (Şekil 13 ve 14)'te verilmiştir. Hareket beklenen zemin içerisine tutturulmuş tijler ile hareket beklenen zemin içerisinden geçirilerek duraylı zemine tutturulmuş tijlerden alınan okumalarda artış veya azalış gözlenmektedir [2]. Hareketli kütle içerisinde kalan tijlerin ölçüm değerleri artarken hareket dışına tutturulmuş tijlere ait ölçüm değerleri azalma göstermektedir. Kayma düzlemi yük alan tijlerle yük kaybeden tijler arasından geçtiği bu ölçümlerle belirlenmektedir. Proje kapsamında bu amaçla E1, E2, E3 kesitlerinin belirli kademelerine çok sensörlü ekstansometreler yerleştirilerek şevlerde meydana gelebilecek hareketler ölçülmüştür. Ölçüm verileri grafiklere aktarılarak analiz edilmiştir.

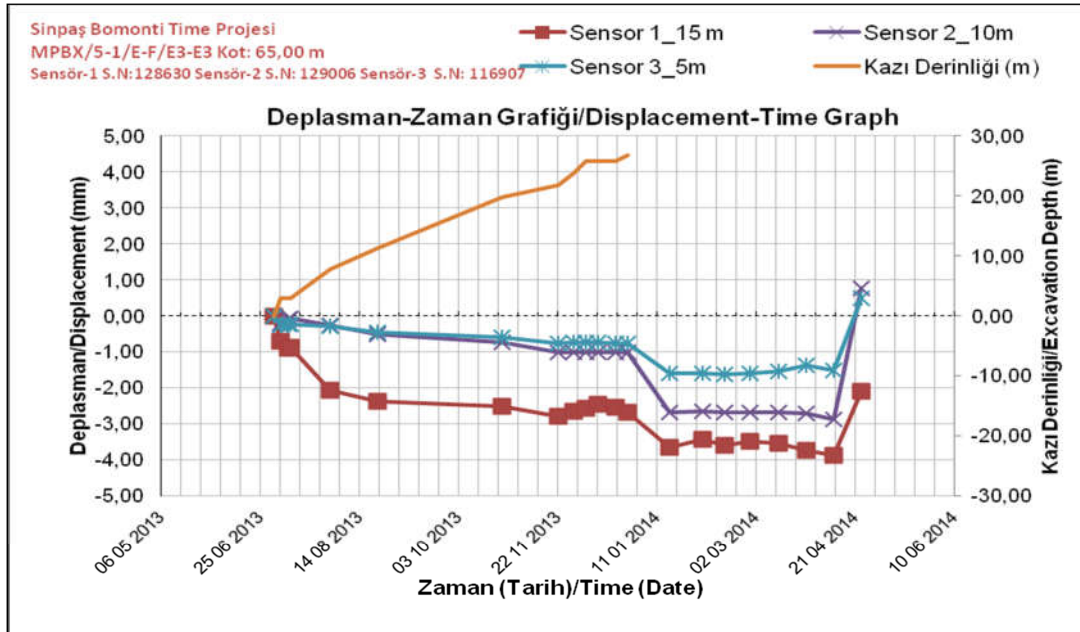
#### 4.4. Manyetik Oturma Kolonu

Manyetik oturma kolonu zeminlerde düşey yöndeki oturma miktarını ölçmek için kullanılan bir ölçüm aletidir. Açılan düşey sondaj kuyusu içerisine inklinometre borularının dış yüzeyine monte edilerek ya da herhangi bir borulama sistemi kullanılarak zemin içerisine belirli aralıklarla yerleştirilir. Yerleştirilen derinlikler ölçülerek kayıt edilir [2].

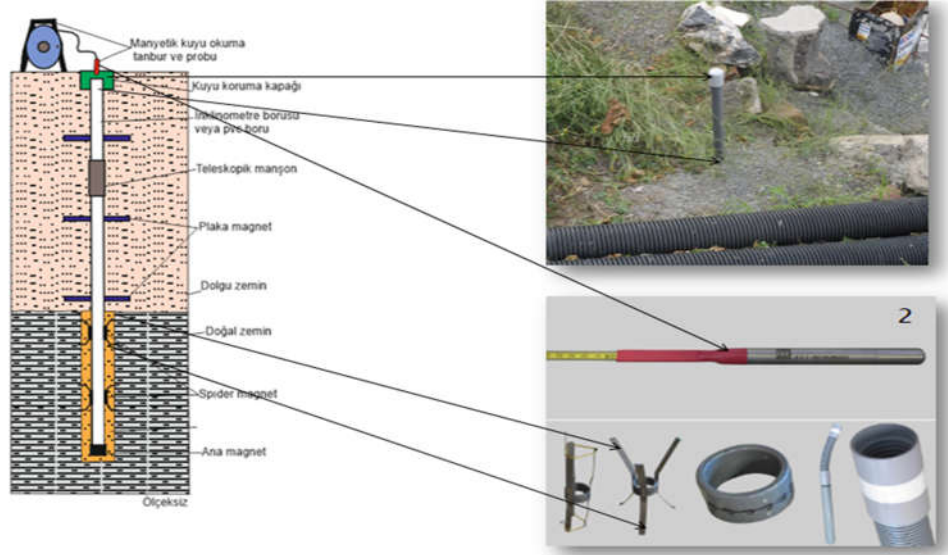
Yerleştirilen magnetlerin enjeksiyon yardımı ile zeminin bir parçası gibi davranması sağlanır, böylelikle zeminde meydana gelen oturma ile birlikte magnetlerde hareket eder. Düşüklü manyetik oturma ölçer yardımı ile bu oturma miktarı ölçülerek ilk okumalarla arasındaki farklar bulunur. Bulunan bu fark değeri zeminin oturmasıyla ilgili bilgi elde edilmesini sağlar. Proje kapsamında manyetik oturma kolonları ofis cephesinde yer alan E1, E2, E3 kesitlerine yerleştirilmiştir. Manyetik oturma kolonu ile ilgili yerleşim çizelgesi ve ölçüm grafiği (Şekil 14 ve Şekil 15)'te verilmiştir.



Şekil 12. Ekstansometre verilerinden elde edilen hareket noktası kazı yüzeyi grafikleri



Şekil 13. Ekstansometre verilerinden elde edilen deplasman zaman grafikleri [4]

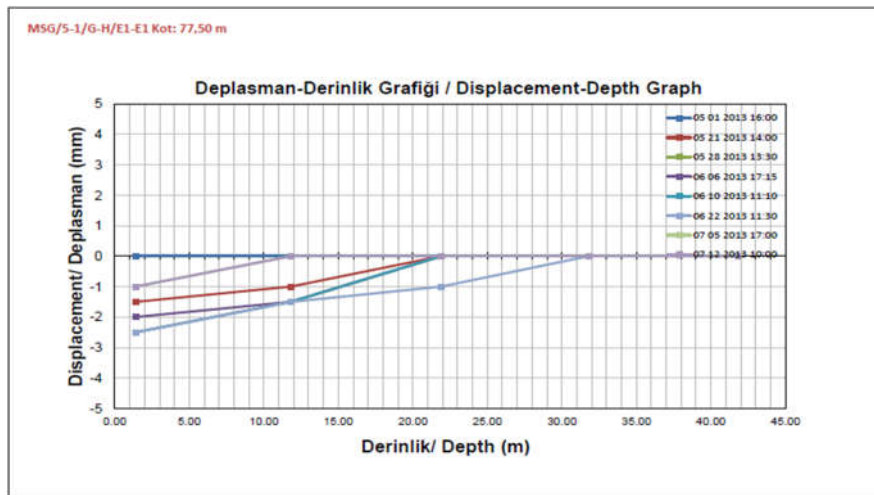


Şekil 14. Manyetik oturma kolonu saha yerleşim planı

#### 4.5. Piyezometre

Proje alanında yeraltı suyu değişimlerini ölçmek amacıyla E1, E2, E3, E6, E7, E8, E12 ve E13 kesitlerine her kesitte ikişer adet olmak üzere 8 adet piyezometre kuyusu açılarak piyezometreler yerleştirilmiştir. Yerleştirilen piyezometrelerden ilki kuyu tabanına yakın derinliğe yerleştirilirken ikinci piyezometre kuyunun orta kısmına yerleştirilmiştir. Yerleştirilen piyezometrelerin alt kısımları 1 m kalınlığında bentonit malzeme ile

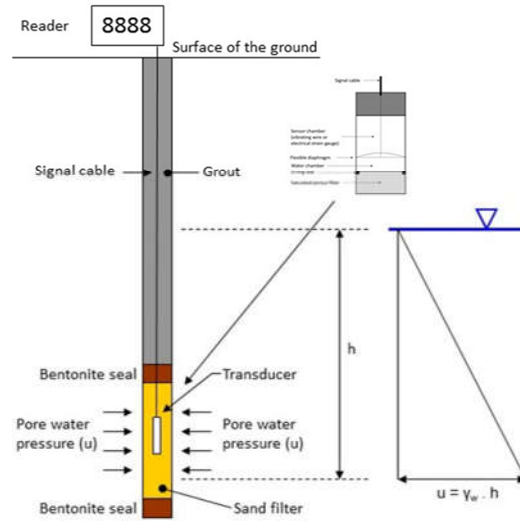
geçirimsiz bir zon oluşturulmuştur. 1 m kalınlığında geçirimsiz bentonit zon üzerine 1m kalınlığında kum filtre oluşturulduktan sonra jeotekstil ile sarılmış kum filtre içerisindeki piyezometre bu 1 m'lik filtre dolgu üzerine temas edecek şekilde düşey doğrultuda tutularak piyezometre çevresi ve üstü 1m kum filtre oluşturulacak şekilde filtre işlemi tamamlanmıştır. Filtre yapımı tamamlandıktan sonra tekrar 50 cm kalınlığında geçirimsiz bentonit zon oluşturulmuştur [2].



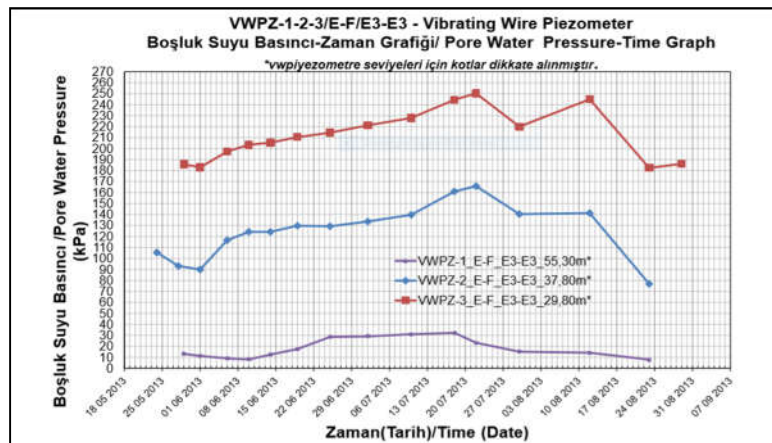
Şekil 15. Manyetik oturma ait yer değiştirme (deplasman) derinlik grafiği



Şekil 16. Piyezometrenin kum filtre ile sarılması



Şekil 17. Piyezometrenin yerleşim şeması



Şekil 17. Boşluk suyu basıncı zaman grafikleri

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışma İstanbul İli, Şişli İlçesinde, yer alan çok katlı yapının derin temel kazı çalışmaları boyunca yürütülen çalışmalarda jeoteknik ölçüm yapmak için kullanılan inklinometre, yük hücresi, piyezometre, ekstansometre ölçüm aletleri ve bu ölçüm aletleri ile yapılan ölçümlerden elde edilen veriler değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular her bir ölçüm aleti için aşağıda özetlenmiştir.

Proje kapsamında 104 jeoteknik ölçüm aleti yerleştirilerek ölçüm yapılmıştır. 19 adet inklinometre, 54 adet yük hücresi, 14 adet ekstansometre, 3 adet manyetik oturma kolonu, 14 adet piyezometre kullanılmıştır. Bu ölçüm aletlerinin kullanıldığı proje alanının temel birimi Paleozoik yaşlı Trakya formasyonundan meydana gelmektedir. Formasyonun başlıca birimlerini kumtaşı şeyl ve kil taşları oluşturmaktadır. Bu birimlerin kalınlıkları çalışma sahası boyunca değişiklik göstermektedir. Proje alanının zemin ve mühendislik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla 10 adet araştırma sondaj kuyusu açılmıştır. Açılan sondaj kuyularında yeraltı su seviyesine (yass) SK-5 kuyusunda ve SK-11 nolu sondaj kuyusunda 4,5. m'de SK-7 kuyusunda ise 19,3 m' de ölçülmüştür. Proje alanında yapılan aletsel ölçüm, jeolojik araştırmalar, sondaj çalışmaları, laboratuvar analizleri, teknik hesaplamalar ve gözlemsel araştırmalarla jeoteknik veriler toplanmıştır. Bu veriler değerlendirilerek derin kazı çalışmalarının yürütülmesinde kullanılan jeoteknik ölçüm aletlerinin şev hareketlerinin aletsel ölçümündeki gerekliliğine değinilmiştir.

### 5.1. Ölçüm Verilerine Göre Gözlemlenen Aşırı Yer Değiştirmeler

Proje alanın E4 kesitinde yer alan tünel cephesinde yüzey sularının etkisi ile ileri derecede bozunmaya uğrayan kumtaşı ve killi birimler içerisinde yapılan temel kazı sonucu yapılan yüzeysel incelemeler ve yerleştirilen ölçüm aletlerinden alınan ölçümler sonucunda kesitteki yatay yer değiştirme miktarının artan kazı derinliğine bağlı olarak

problem oluşturacağı kanaatine varılarak kesitte oluşturulan kazı destek sistemi güçlendirilmiştir. E4 kesitinde meydana gelen hareketlilik şeyl birimi içerisinde meydana gelmiştir. Yapılan inklinometre ölçümüne göre kuyu üst ucundan 6m derinde meydana gelen yatay yer değiştirme miktarı kazı yönünde 30 mm olarak ölçülmüştür. Aynı kesitte yer değiştirme öncesi alınan yük hücresi okuması 498,18 kN iken deplasman sonrası yük miktarı 524,56 kN olarak okunmuştur. İki yük hücresi okuma miktarı arasındaki fark 26,38 kN (2,638t) olarak saptanmıştır. Yapılan yeni ankraj delgileri ve kuşaklı destekleme çalışmaları sonucunda hareket miktarı kontrol altına alınmış, kazı boyunca deplasman miktarının güvenlik sınırları içerisinde kalması sağlanmıştır

### 5.2. Jeoteknik Ölçüm Aletlerinin Şev Hareketliliklerinin Ölçülmesinde Birlikte Kullanılması ve Ölçüm Verilerinin Değerlendirilmesi

**İnklinometre:** İnklinometre verilerinden çalışma kapsamında elde edilen birden çok grafik yardımı ile şevlerde meydana gelen hareketlilik çok yönlü olarak incelenme imkanı sağlamıştır. Ölçüm hassasiyeti çok yüksek olduğu için E4-E4 kesitinde meydana gelen kütle hareketliliği kütleleri oluşturan yapılar birbirinden kopmadan önceden belirlenmiş ve hareketlilik ciddi boyutlara ulaşmadan önlem alınmıştır. Bir tek okuma seti ile birden çok inklinometre kuyusundan okuma alındığı için kazı boyunca daha avantajlı ve ekonomik ölçümler yapılmıştır.

**Yük Hücresi:** Yük hücreleri, çalışma kapsamında zemin çivilerine ve ankraj uçlarına belirli yüklerle yüklenerek yerleştirilmiştir. Yerleşim işlemi yapıldıktan sonra bu aletlerden veri toplama işlemi tamamen elektronik ortamda gerçekleştiği için hata payı oldukça az olmuştur. Kişiye bağlı okuma hatası neredeyse hiç olmamıştır. Yük hücrelerinden saha bilgisayarı yardımı ile sahada okuma alınabildiği gibi kablolu yoluyla gerekli görüldüğünde otomatik okuyucu sistemlerine bağlanılarak uzaktan okuma alma avantajı da sağlamıştır. Çalışma kapsamında belirli aralıklarla yerleştirilen yük hücreleri ankraj sistemlerinin birlikte çalışıp çalışmadığı hakkında önemli veriler

sağlamıştır. Yük hücrelerinden elde edilen grafikler kullanılarak ölçüm sıklığına bağlı olarak kazı derinliği şev hareketliliği ilişkisi sürekli gözlemlenmiştir. Farklı ölçüm disiplinine sahip diğer ölçüm aletleri ile birlikte aynı kesitlerde kullanıldığı için ölçüm aletlerinin ölçüm hassasiyetleri açısından sınıflandırılmasına olanak sağlamıştır.

**Ekstansometre:** Yatay hareketliliği ölçmek amacıyla E1, E2 ve E3 kesitlerine 14 adet ekstansometre yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlerle ölçülen en büyük yer değiştirme E2 kesitinde 3,8 mm olarak ölçülmüştür. Ölçülen bu değer kesit için risk teşkil etmemiştir. Meydana gelen 3,8 mm'lik yer değiştirme ise kazı ile kaldırılan zemin ağırlığına bağlı genleşme hareketi olarak öngörülmüştür.

**Manyetik Oturma Kolonu:** Proje kapsamında yerleştirilen oturma kolonları yoluyla düşeyde meydana gelen yer değiştirmeler periyodik olarak ölçülmüş, ölçüm verileri diğer ölçüm aletlerinden elde edilen verilerle birlikte analiz edilerek kazı kontrollü bir şekilde sürdürülmüştür. Yapılan ölçümler sonucu çalışma alanında düşey yönde risk meydana getirecek boyutlarda bir oturma ölçülmemiştir.

**Piyezometre:** Temel kazısı boyunca şev gerisinde açılan sondaj delgilerine yerleştirilen piyezometre ölçümleri ile yeraltı suyu değişimleri gözlemlenerek artan kazı derinliği süresince kütle hareketlerine olan veya olabilecek etkileri düzenli olarak gözlenmiştir. Yeraltı suyu değişimleri mevsimsel yağışlar dışında önemli bir değişkenlik göstermemiştir.

## 6. SONUÇLAR

Yapılan çalışma süresince elde edilen jeoteknik veriler genel olarak değerlendirildiğinde;

Çalışma boyunca aynı kesite yerleştirilen farklı ölçüm disiplinine sahip jeoteknik ölçüm aletleri olan yük hücresi, ekstansometreler ve manyetik oturma kolonları ve piyezometreler birlikte kullanılmış alınan yer değiştirme miktarları yatay

ve düşey yönlü olarak yeraltı suları etkisinde ölçülmüştür. Yapılan çok yönlü ölçümler ile meydana gelen yer değiştirmeler inklinometre ile yatayda milimetre olarak ölçülürken, yük hücreleri bu yatay yer değiştirmeye neden olan kütle hareketini kN birim ile ölçmüştür. Kesitlere yerleştirilen ekstansometreler ise yer değiştirme miktarlarını, bu yer değiştirmenin meydana geldiği noktanın kazı yüzeyi ile olan ilişkisini çeşitli grafikler yardımı ile inceleme olanağı sağlamıştır. Meydana gelen oturma miktarları ise yerleştirilen manyetik oturma kolonları ile ölçülmüştür. Kazı boyunca aynı kesite yerleştirilen farklı jeoteknik ölçüm aletlerinden alınan veriler birlikte analiz edilerek bu veriler ışığında derinliği 50 metreden fazla olan derin temel kazısı ciddi şev hareketlilikleri yaşanmadan tamamlanmıştır. Yapılan bu çalışma gösteriyor ki derin kazılarda meydana gelen veya gelebilecek kazalar yapılacak jeoteknik ölçümler ile önlenmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Özaydın, K., Yıldırım, M., 2000. İstanbul'un Zemin Koşulları ve Geoteknik Sorunlar Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Bölümü.
2. Keskin, V., 2018. Derin Kazı Temelerde Şev Duraylılığının Aletsel Ölçümü ve Ölçüm Verilerin Değerlendirilmesi. Ç.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
3. Keskin, V., Türkmen, S., 2019. Derin Kazılarda Şev Duraylılığının Aletsel Ölçümü ve Ölçüm Aletlerinin Değerlendirilmesi. Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu, 03-05 Ekim 2019, Denizli.
4. Yüksel, S., Bakılar, G., 2009. Proje Alanı Jeoteknik Etüt ve Sondaj Çalışmaları Temel Etüt Raporu. Elc Group Müş. ve Müh. Ltd. Şti. İstanbul.
5. Keskin, V., Çakar, G., 2015. Sinpaş Bomonti Time Projesi Jeoteknik Enstrümantasyon Gözlem Raporları (1-40), Geogrup İnşaat A.Ş., İstanbul.
6. Digital Inclinator System Rstinstrument Ltd. Digital mems <http://www.rstinstrument.com>



## Pressure Influence on the Thermophysical Properties of 316L Austenitic Stainless Steels Manufactured By Powder Metallurgy Method

Ayşe Nur ACAR<sup>1</sup>, Abdul Kadir EKŞİ<sup>\*2</sup>, Ahmet EKİCİBİL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Çukurova University, Ceyhan Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department Ceyhan Adana

<sup>2</sup>Çukurova University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department Sarıçam, Adana  
<sup>3</sup>Çukurova University, Arts and Sciences Faculty, Physical Department Sarıçam, Adana

Geliş tarihi: 08.04.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Abstract

Austenitic stainless steel that is used in the industrial areas such as automotive has high physical and mechanical properties. In this study; thermophysical properties of 316L austenitic stainless steel prepared by powder metallurgy method that is attracted for researchers due to obtain net or near shaped product and complex shaped materials, have been investigated. Austenitic stainless steels pressed on the 400 and 600MPa pressures and pressed austenitic stainless steel samples sintered at 1200 °C temperature for an hour under inert gas atmosphere. The thermophysical features of these sintered austenitic stainless steel were performed at temperature ranging from RT to 600 °C via heat flux type Differential Scanning Calorimeter (DSC). These properties supported by SEM images, EDS spectrums and OM (Optic microscope) images.

**Key Words:** Specific heat capacity, Enthalpy, Austenitic stainless steel, Powder metallurgy

### Toz Metalurjisi ile Üretilen 316L Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Termofiziksel Özelliklerin Üzerindeki Basıncın Etkisi

### Öz

Otomotiv gibi endüstriyel alanlarda kullanılan östenitik paslanmaz çelik yüksek fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahiptir. Bu çalışmada benzer ya da benzere yakın şekilli ürün ve karmaşık şekilli malzeme üretilmesine olanak sağlanmasından dolayı araştırmacılar tarafından cazip görülen toz metalurjisi yöntemiyle hazırlanan 316L östenitik paslanmaz çeliğin termofiziksel özellikleri araştırılmıştır. Östenitik paslanmaz çelikler 400 ve 600 MPa basınçlarında preslenmiş ve preslenen östenitik paslanmaz çelik numuneler 1200 °C sıcaklığında 1 sa boyunca inert gaz atmosferinde sinterlenmiştir. Bu sinterlenmiş östenitik paslanmaz çeliklerin termofiziksel özellikleri oda sıcaklığından 600 °C'ye kadar olan sıcaklık aralığında ısı akısı tipli Diferansiyel Taramalı Kalorimetreye (DSC) ile ölçülmüştür. Bu özellikler SEM görüntüleri, EDS spektrumları ve OM (optik mikroskop) görüntüleri ile desteklenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Özgül ısı kapasitesi, Entalpi, Östenitik paslanmaz çelik, Toz metalurjisi

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Abdul Kadir EKŞİ, [akeksi@cu.edu.tr](mailto:akeksi@cu.edu.tr)

## 1. INTRODUCTION

Thermophysical properties of materials are varied with temperature but not cause to changes on the chemical properties of materials. Specific heat capacity and enthalpy features are thermophysical properties of materials. Specific heat capacity is needed heat amount to increase temperature of 1 g of materials by 1 °C and enthalpy is internal energy of materials [1,2,3]. Specific heat capacity and enthalpy of materials features are calculated following formulas [2,4] (Equations 1 and 2);

$$C_p = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 \quad (1)$$

$$\Delta H = \int c_p dT \quad (2)$$

Equation (1) formularizes specific heat capacity of materials and Equation (2) is obtained by integrated of specific heat capacity of materials and formularizes enthalpy behaviours of materials. On the Equations (1) and (2);  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  are coefficients of specific heat capacity of elements and  $T$  is temperature.  $c_p$  and  $\Delta H$  are referred as specific heat capacity and enthalpy symbols [2,4].

Powder metallurgy used in widely applied in the industrial areas provides to obtain similar or near to similar shaped products and high physical properties owing to closing porosity and grain bonding by method's very nature. On the method; powder /powder preparation, compaction of powder /powder mixture and sintering of compacted green bulk products are stages of this method. Sintered bulk products have more strengthening structure according to green bulk products [5-9].

In this study; specific and heat capacity and enthalpy behaviours of 316L austenitic stainless steel samples that is widely used in industrial areas and has low amounts of carbon, chromium, nickel and molybdenum, have been examined.

## 2. MATERIAL AND METHOD

In this study; 316L austenitic powder that obtained from North American Höganäs, Co. utilized the

chemical composition (wt%) of this powder consists of 16.41 of Cr, 13.18 of Ni, 2.17 of Mo, 0.98 of Si, 0.23 of Mn, 0.02 of C, 0.018 of P, balance of Fe and 1.0 of acrawax as binder; and mean particle size distribution of this powder is 14.04  $\mu\text{m}$ . This austenitic stainless steel powder pressed on the 400 and 600 MPa pressures using traditional pressing technique. Pressed stainless steel compacts sintered according to heat treatment cycle specified in Figure 1. Sintering process happened under Ar atmosphere. Firstly samples annealed at 600 and 900 °C temperatures for 30 min in order to provide debind of grains in the green bulk product and uniform temperature distribution in the furnace according to literature [10-12]. After then, samples sintered at 1200 °C temperature for an hour. Heating and cooling rate were selected as 5 °C/min. The thermophysical features of these sintered austenitic stainless steels were performed at temperature ranging from RT to 600 °C via heat flux type Differential Scanning Calorimeter (DSC) using  $\text{N}_2$  of gas, 20 mL/min of gas flow and 20°C/min of gas rate.

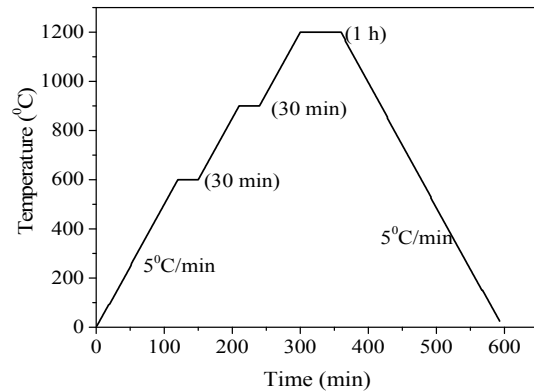
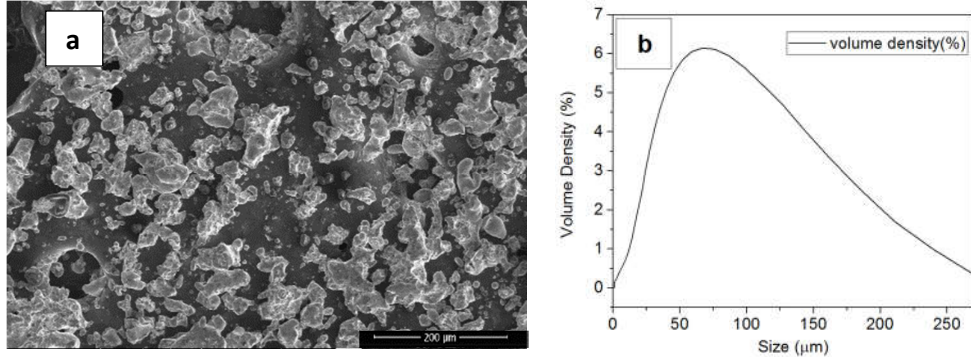


Figure 1. The heat treatment cycle

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

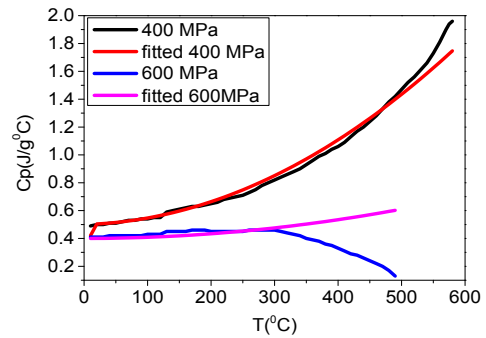
The SEM image and particle size distribution of 316L austenitic stainless steel powder were showed in Figure 2. According to SEM image of this powder; particle size of powder has irregular shape that type of water atomized particle and particle size distribution of this powder showed the positively skewed particle size distribution due to mostly fine particles into the alloy [13-15].



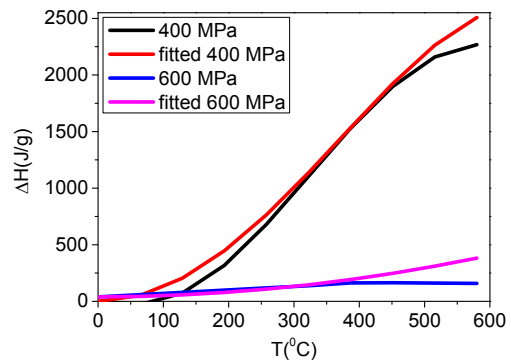
**Figure 2.** The SEM Image and particle size distribution of 316L austenitic stainless steel powder

Figure 3 and Figure 4 shows the specific heat capacity ( $J/g^{\circ}C$ ) –temperature ( $^{\circ}C$ ) and enthalpy ( $J/g$ ) –temperature ( $^{\circ}C$ ) curves of sintered 316L austenitic stainless steel samples. As seen in Figure 3; when temperature increased; specific heat capacity and enthalpy values increased but not perfect linearly increase due to rising of amplitude of atomic vibration of the stainless steels’s composition with rising temperature [16]. On the austenitic stainless steel prepared on the 600 MPa pressure; when increasing temperature from 300  $^{\circ}C$  temperature; specific heat capacity values of this material decreased. As pressure increased; specific heat capacity and enthalpy of these austenitic stainless steel samples decreased. This situation can be recommended that occurring of reaction between alloying elements and carbon happens a liquid phase. This phase leads to densification [17]. Much carbon existence on the stainless steel prepared on the 400 MPa pressure play a role on the occurring of transformation of martensitic structure [18]. Porosity existence were appeared on both of austenitic stainless steel. Austenitic stainless steel prepared on the 400 MPa pressure has more porosity than that of other stainless steel. This situation can be considered that porosity existence and martensitic structure have decreasing effect on the both of specific heat capacity and enthalpy values of 316L austenitic stainless steels with increasing of pressure. As carefully examining of specific heat capacity values of both of austenitic stainless steel prepared on the 400 and 600 MPa pressures; frustrating was observed at temperature ranges from  $\approx 100$  to  $\approx 200$   $^{\circ}C$ , it can be considered that this situation is

exothermic peak and it can be commented that this peak is resulted increasing from minor precipitation during heat treatment cycle on the manufacturing process [19].



**Figure 3.** The specific heat capacity ( $J/g^{\circ}C$ )–temperature ( $^{\circ}C$ ) curves of sintered 316L austenitic stainless steel samples



**Figure 4.** The enthalpy ( $J/g$ ) –temperature ( $^{\circ}C$ ) curves of sintered 316L austenitic stainless steel samples

Maximum specific heat capacity and enthalpy obtained on the austenitic stainless steel prepared on the 400 MPa pressure (013 J/ g°C at 490°C and 2268.2 J/g at 580 °C, respectively). On the Tables 1 and 2; specific heat capacity and enthalpy values of these austenitic stainless steel samples are given with fitted values and errors (%) and on the Tables 3 and 4; the fit coefficients and

nonlinear square regression values of austenitic stainless steel samples are given by helping of Microsoft Excel Office program. According to these square regression values; the best fit obtained on the austenitic stainless steel prepared on the 400 MPa pressure for specific heat capacity and enthalpy behaviours ( $R^2= 0.9494$  and  $1.00$  for specific heat capacity and enthalpy, respectively).

**Table 1.** The specific heat capacity v.s. Temperature values of 316L austenitic stainless steels

T(°C)	$c_p$ (J/g°C) (400 MPa)	Fitted $c_p$ (J/g°C) (400MPa)	Error(%)	$c_p$ (J/g°C) (600 MPa)	Fitted $c_p$ (J/g°C) (600MPa)	Error(%)
10	0.49	0.42	-14.2857	0.41	0.400092	-2.41659
20	0.5	0.50380	0.760225	0.41	0.400352	-2.35317
30	0.5	0.506750	1.350067	0.41	0.40078	-2.24878
40	0.51	0.51040	0.078459	0.42	0.401376	-4.43429
50	0.51	0.514750	0.931387	0.42	0.40214	-4.25238
60	0.52	0.519800	-0.03845	0.42	0.403072	-4.03048
70	0.53	0.525550	-0.83962	0.42	0.404172	-3.76857
80	0.53	0.532000	0.377362	0.42	0.40544	-3.46667
90	0.54	0.539150	-0.15741	0.42	0.406876	-3.12476
100	0.54	0.54700	1.296298	0.43	0.40848	-5.00465
110	0.55	0.555550	1.009092	0.43	0.410252	-4.59256
120	0.55	0.564800	2.69091	0.43	0.412192	-4.1414
130	0.59	0.574750	-2.158475	0.45	0.4143	-7.93333
140	0.6	0.585400	-2.43333	0.45	0.416576	-7.42756
150	0.61	0.596750	-2.17213	0.45	0.41902	-6.88444
160	0.62	0.608800	-1.80645	0.45	0.421632	-6.304
170	0.63	0.621550	-1.34127	0.46	0.424412	-7.73652
180	0.63	0.63500	0.793651	0.46	0.42736	-7.09565
190	0.64	0.64915	1.429688	0.46	0.430476	-6.41826
200	0.65	0.66400	2.153846	0.45	0.43376	-3.60889
210	0.66	0.679550	2.962121	0.45	0.437212	-2.84178
220	0.68	0.695800	2.32353	0.45	0.440832	-2.03733
230	0.69	0.712750	3.297102	0.45	0.44462	-1.19556
240	0.7	0.73040	4.342857	0.45	0.448576	-0.31644
250	0.71	0.74875	5.457747	0.45	0.4527	0.6
260	0.73	0.7678	5.178082	0.46	0.456992	-0.65391
270	0.75	0.78755	5.006667	0.46	0.461452	0.315652
280	0.78	0.808	3.589744	0.46	0.46608	1.321739
290	0.8	0.82915	3.64375	0.46	0.470876	2.364348
300	0.82	0.851	3.780488	0.46	0.47584	3.443478
310	0.84	0.87355	3.994048	0.45	0.480972	6.882667
320	0.86	0.8968	4.27907	0.44	0.486272	10.51636
330	0.88	0.92075	4.630682	0.43	0.49174	14.35814
340	0.9	0.9454	5.044444	0.42	0.497376	18.42286
350	0.93	0.97075	4.38172	0.4	0.50318	25.795
360	0.96	0.9968	3.833333	0.39	0.509152	30.55179
370	0.99	1.02355	3.388889	0.38	0.515292	35.60316
380	1.01	1.051	4.059406	0.36	0.5216	44.88889
390	1.04	1.07915	3.764423	0.35	0.528076	50.87886
400	1.06	1.108	4.528302	0.33	0.53472	62.03636
410	1.09	1.13755	4.362385	0.31	0.541532	74.68774

420	1.13	1.1678	3.345133	0.29	0.548512	89.14207
430	1.17	1.19875	2.457265	0.28	0.55566	98.45
440	1.2	1.2304	2.533333	0.26	0.562976	116.5292
450	1.24	1.26275	1.834677	0.24	0.57046	137.6917
460	1.28	1.2958	1.234375	0.22	0.578112	162.7782
470	1.33	1.32955	-0.03383	0.2	0.585932	192.966
480	1.38	1.364	-1.15942	0.17	0.59392	249.3647
490	1.42	1.39915	-1.46831	0.13	0.602076	363.1354
500	1.47	1.435	-2.38095			
510	1.52	1.47155	-3.1875			
520	1.56	1.5088	-3.28205			
530	1.61	1.54675	-3.92857			
540	1.66	1.5854	-4.49398			
550	1.73	1.62475	-6.08382			
560	1.81	1.6648	-8.0221			
570	1.9	1.70555	-10.2342			
575	1.94	1.7261875	-11.0213			

**Table 2.** The Enthalpy v.s. temperature values of 316L austenitic stainless steels

T (°C)	$\Delta H$ (J/g) (400 MPa)	Fitted $\Delta H$ (J/g) (400MPa)	Error (%)	$\Delta H$ (J/g) (600 MPa)	Fitted $\Delta H$ (J/g) (600MPa)	Error (%)
0	-0.83	0.0001	-100.012	39.17	39	-0.43401
64.45	29.14	51.66382	-277.295	59.24	43.79919	-26.0648
128.9	72.24	203.5493	181.7681	79.26	56.91135	-28.1966
193.35	317.86	446.3392	40.42006	99.16	78.34182	-20.9945
257.8	681.18	764.505	12.23245	118.88	108.096	-9.07137
322.25	1105.17	1136.307	2.817357	137.83	146.1791	6.057541
386.7	1529.15	1533.792	0.303585	162.78	192.5966	18.31714
451.15	1897.55	1922.799	1.330613	164.48	247.3539	50.3854
515.69	2159.43	2263.372	4.813409	161.31	310.5502	92.51764
580.05	2268.2	2507.666	10.55754	158.15	381.909	141.4853

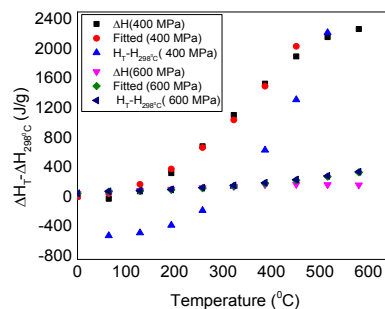
**Table 3.** The fit coefficients and nonlinear-squares regression values of specific heat capacity behaviour of 316L austenitic stainless steel samples

	316L/400 MPa	316L/600 MPa
$c_0$	0.5	0.4
$c_1$	0.00012	0.0000008
$c_2$	0.0000035	0.00000084
$c_3$	0.009	0.0000003
$R^2$	0.9494	0.9401

**Table 4.** The fit coefficients and nonlinear-squares regression values of enthalpy behaviour of 316L austenitic stainless steel samples

	316L/400 MPa	316L/600 MPa
$c_0$	4.00E-01	0.5
$c_1$	0.00000012	0.0011
$c_2$	9.00E-12	9E-12
$c_3$	0	0
$c_4$	3.90E+01	70
$R^2$	1.00	0.9882

In Figure 5; the enthalpy ( $\Delta H_T - \Delta H_{298}^{\circ}$ )-temperature curves of 316L austenitic stainless steel samples were shown with experimental and fitted enthalpy values. The enthalpy ( $\Delta H_T - \Delta H_{298}^{\circ}$ ) v.s. temperature values of 316L austenitic stainless steels were given in Table 5.



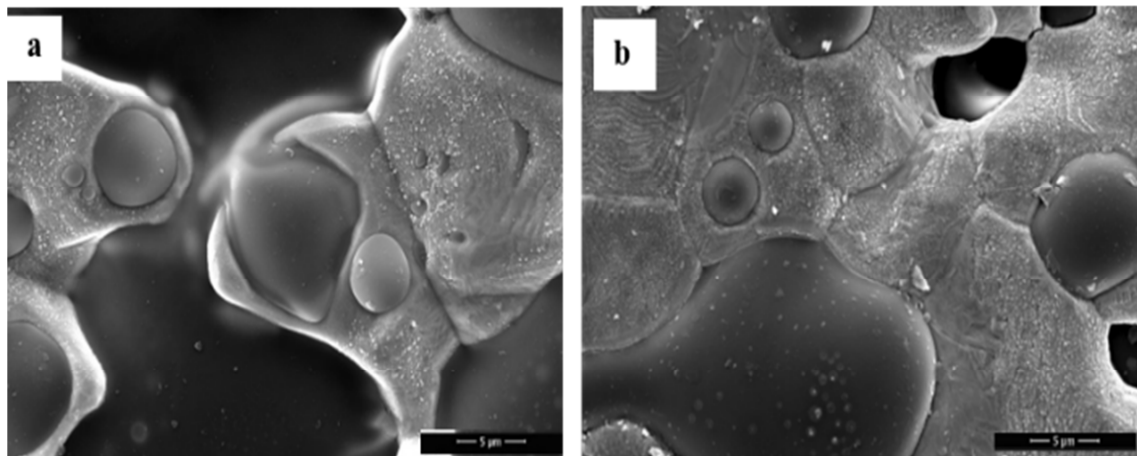
**Figure 5.** The Enthalpy enthalpy ( $\Delta H_T - \Delta H_{298}^{\circ}$ ) (J/g)-temperature (°C) curves of sintered 316L austenitic stainless steel samples

In Figure 6; the SEM images of 316L austenitic stainless steels prepared on 400 and 600 MPa pressures observed. From Figure 6, it was observed that when pressure increased, closing porosity and grain bonding observed. On the austenitic stainless steel prepared on the low pressure; liquid phase formation among grains was clearly seen. It can be commented that higher specific heat capacity and enthalpy values of this austenitic stainless steel sample values than that of other austenitic stainless steel resulted from this situation. It was also seen and considered that ferrite grains and austenite matrix are also

observed. On the Table 6, the EDS spectrums of both of austenitic stainless steels samples are given. From EDS spectrums; it was appeared that all alloying elements homogeneously dispersed on the surface of both of stainless steel samples and carefully examined that Si alloying element on the austenitic stainless steel samples prepared on the low pressure has higher than that of other austenitic stainless steel sample. Si has a significant role on the stabilizing ferritic structure and enhances the thermophysical properties of austenitic stainless steel samples [20].

**Table 5.** The Enthalpy ( $\Delta H_T - \Delta H_{298}^0$ ) v.s. temperature values of 316L austenitic stainless steels

T (°C)	$\Delta H$ (J/g) (400 MPa)	Fitted $\Delta H$ (J/g) (400MPa)	$\frac{\Delta H_T - \Delta H_{298}^0}{\Delta H_{298}^0}$ (J/g) (400 MPa)	$\Delta H$ (J/g) (600 MPa)	Fitted $\Delta H$ (J/g) (600MPa)	$\Delta H_T - \Delta H_{298}^0$ (J/g) (600 MPa)
0.01	-0.83	-1.8785	-802.079	39.17	42.50002695	45.03376
64.45	-29.14	41.53453	-762.137	59.24	67.940832	71.61114
128.9	72.24	166.1486	-649.927	79.26	76.90174504	81.54315
193.35	317.86	373.8388	-462.949	99.16	92.12903468	98.07982
257.8	681.18	664.605	-201.205	118.88	113.8689965	121.2212
322.25	1105.17	1038.447	135.3063	137.83	142.3679261	150.9673
386.7	1529.15	1495.366	546.5834	162.78	177.8721189	187.3183
451.15	1897.55	2035.36	1032.626	164.48	220.6278706	230.2741
515.69	2159.43	2659.359	1594.269	161.31	270.9570098	279.9087
580.05	2268.2	3364.577	2229.006	158.15	328.8792329	336.0006



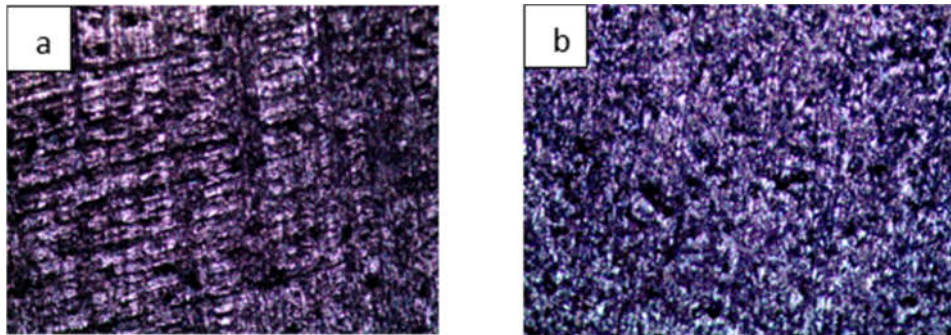
**Figure 6.** The SEM Images of 316L austenitic stainless steel prepared on 400 (a) and 600 (b) pressures

**Table 6.** The EDS spectrums of 316L austenitic stainless steels

		316L /400 MPa		316L/ 600 MPa	
	Element	Weight %	Atomic%	Weight %	Atomic%
Spectrum 1	Cr	16.89	17.97	16.53	15.25
	Fe	67.44	66.82	68.87	59.14
	Ni	12.01	11.32	12.24	10.00
	Mo	2.40	1.38	1.67	0.83
	Si	1.26	2.50	0.68	1.17
Spectrum 2	Cr	16.01	15.46	15.52	14.19
	Fe	64.02	57.52	69.85	58.97
	Ni	11.04	9.43	12.20	9.87
	Mo	2.18	1.14	1.66	0.82

Figure 7 shows OM (optic microscope) images of both of austenitic stainless steel samples; OM images showed that both of 316L austenitic stainless steels have uniform surfaces. Pressure effect observed on the decreasing porosity and occurring of grain bonding with grain binding. [21]. According to literature; microstructures of

both austenitic stainless steels having uniform surfaces involves of austenitic matrix and indiscriminately disrupted ferritic grains throughout grains [22-24]. This case also observed on the SEM images of these stainless steel samples.

**Figure 7.** The OM Images of 316 austenitic stainless steel prepared on 400 (a) and 600 (b) pressures

#### 4. CONCLUSION

In this study; the thermophysical properties of PM-316L austenitic stainless steel compacts were investigated. Following experimental results are given.

1. As temperature increased, specific heat capacity and enthalpy properties of stainless steels increased.
2. As pressures increased, these properties of stainless steels are decreased.

3. On the SEM images and OM images; ferritic grains and austenitic matrix observed.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

This study is financially supported by Çukurova University Research Funding (FBA-2018-11074).

#### 6. REFERENCES

1. Morintale, E., Harabor, A., Constantinescu, C., Rotaru, P., 2015. Use of Heat Flows from DSC

- Curve for Calculation of Specific Heat of the Solid Materials, Physics AUC. 23, 89-94.
2. Wielgosz, E., Kargul, T., Falkus, J., 2014. Comparison of Experimental and Numerically Calculated Thermal Properties of Steels, International Conference on Metallurgy and Materials, Metal 2014, May 21<sup>st</sup>-23<sup>rd</sup> 2014, Brno, Czech Republic.
  3. Fang, H., Wong, M.B., Bai, Y., 2015. Use of Kinetic Model for Thermal Properties of Steel at High Temperatures, Australian Journal of Civil Engineering, 13(1), 40-47.
  4. Kelley, K.K., 1949. X. High-Temperature Heat-Content, Heat-Capacity, and Entropy Data for Inorganic Compounds, Bureau of Mines Bull. 476, 192.
  5. Acar, A.N., Ekşi, A.K., Ekicibil, A., 2019. Effect of Pressure on the Magnetic and Structural Properties of X2CrNiMo17-12-2 Austenitic Stainless Steel Prepared by Powder Metallurgy Method Journal of Molecular Structure, 1198, 126876.
  6. Acar, A.N., Mutlu, R.N., Ekşi, A.K., Ekicibil, A., Yazıcı, B., 2018. Effect of Temperature and Pressure on Mechanical, Surface and Electrochemical Properties of Al-1.5Cu-5.5Zn-2.5Mg (Alumix-431), Anti-Corrosion Methods and Materials 65/6, 558–571.
  7. Akhavan Tabatabae, B., Ashrafizadeh, F., Hassanlı, A.M., 2011. Influence of Retained Austenite on the Mechanical Properties of Low Carbon Martensitic Stainless Steel Castings, ISIJ International, 51(3), 471–475.
  8. Azevedo, J.M.C., Serrenho, A.C., Allwood, J.M., 2018. Energy and Material Efficiency of Steel Powder Metallurgy, Powder Technology 328, 329–336.
  9. Kulkarni, H., Dabhade, V.V., 2019. Green Machining of Powder-Metallurgy-Steels (PMS): An Overview, Journal of Manufacturing Processes 44, 1–18.
  10. Butković, S., Oruč, M., Šarić, E., Mehmedović, M., 2012. Effect of Sintering Parameters on the Density, Microstructure and Mechanical Properties of the Niobium-Modified Heat-Resistant Stainless Steel GX40CrNiSi25-20 Produced by MIM Technology, Materiali in tehnologije/Materials and technology 46(2), 185-190.
  11. Butković, S., 2013. Sinterability and Tensile Properties of Nickel Free Austenitic Stainless Steel X15CrMnMoN 17 11 3, Tehnički vjesnik (Technical Gazette) 20(2), 269-274.
  12. Pandya, S., Ramakrishna, K.S., Annamalai, A.R., Upadhyaya, A., 2012. Effect of Sintering Temperature on the Mechanical and Electrochemical Properties of Austenitic Stainless Steel, Materials Science and Engineering A 556, 271–277.
  13. Rudianto, H., Jang, G., Yang, S., Kim, Y., Dlouhy, I., 2015. Effect of SiC Particles on Sinterability of Al-Zn- Mg-Cu P/M Alloy”, Archives of Metallurgy and Materials, 60(2), 1383-1385.
  14. Rudianto, H., Jang, G.J., Yang, S.S., Kim, Y.J. Dlouhy, I. (2015b). Evaluation of Sintering Behavior Of Premix Al-Zn- Mg-Cu Alloy Powder”, Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 987687, 8.
  15. Dyankova, S., Doneva, M., Todorov, Y., Terziyska, M., 2016. Determination of Particle Size Distribution and Analysis of a Natural Food Supplement on Pectin Base, IOSR Journal of Pharmacy, 6(5), 01-08.
  16. Karthikeyan, B., Ramanathan, S., Ramakrishnan, V., 2010. A Calorimetric Study of 7075 Al/SiCp Composites, Materials and Design, 31, 92–95.
  17. Karwan-Baczewska, J., 2015. Processing and Properties of Distaloy SA Sintered Alloys with Boron and Carbon, Archives of Metallurgy and Materials, 60(1), 41-45.
  18. Abdoos, H., Khorsand, H., Shahani, A.R., Fatigue Behavior of Diffusion Bonded Powder Metallurgy Steel with Heterogeneous Microstructure, Materials and Design 30, 1026-1031.
  19. Wilthan, B., Reschab, H., Tanzer, R., Schützenhöfer, W., Pottlacher, G., 2008. Thermophysical Properties of Chromium-Nickel-Molybdenum Steel in the Solid and Liquid Phases, Int. J. Thermophys., 29, 434-444.
  20. Isfahany, A.N., Saghafian, H., Borhani, G., 2011. The Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of AISI420 Martensitic Stainless



- Steel, Journal of Alloys and Compounds 509, 3931–3936
21. Acar, A.N., 2019. Investigation of Physical and Mechanical Properties of 316L and 410 Stainless Steels Manufactured by Powder Metallurgy Method Doctoral Thesis, Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, 139.
  22. Moteshakker, A., Danaee I., 2016. Microstructure and Corrosion Resistance of Dissimilar Weld-Joints between Duplex Stainless Steel 2205 and Austenitic Stainless Steel 316L Moteshakker, A., Danaee I., Journal of Materials Science and Technology, 32, 282-290.
  23. Mamat, M.F., Hamzah E., Ibrahim, Z., Rohah, A.M., Bahador, A., 2015. Effect of Filler Metals on the Microstructures and Mechanical Properties of Dissimilar Low Carbon Steel and 316L Stainless Steel Welded Joints, Materials Science Forum, 819, 57-62.
  24. Simionescu, N., Benea, L., Dumitrascu, V.M., 2018. The Synergistic Effect of Proteins and Reactive Oxygen Species on Electrochemical Behaviour of 316L Stainless Steel for Biomedical Applications, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 374 Euroinvent ICIR 2018 17–18 May 2018, Iasi, 1-7, Romania.



## Dökme Demir Malzemelerin Karbür Uçlarla Delme İşleminde Proses Parametrelerinin Optimizasyonu

Onur ERTUĞRUL<sup>1</sup>, Oğuzcan GÜZELİPEK<sup>\*2</sup>, Tuğrul SOYUSİNMEZ<sup>3</sup>,  
Ali Tuğberk AKDOĞAN<sup>4</sup>, Aziz Burak GÜNEŞ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, İzmir

<sup>2</sup>Totomak Makina ve Yedek Parça Sanayi ve Ticaret A.Ş., İzmir

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara

<sup>4</sup>Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Adana

Geliş tarihi: 26.02.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Takım aşınmalarının, parça üretim maliyeti ve üretim verimliliğine doğrudan etkisi mevcuttur. Takımlarda meydana gelen aşınmalar, üretim kalitesini doğrudan etkileyen bir faktördür. Bu çalışmada, farklı matkap çapları ve kesme parametrelerinin takım aşınmasına etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmada imalat sektöründe sıkça kullanılan 6,8 mm, 9 mm ve 9,6 mm çapa sahip yekpare karbür matkap uçlar kullanılmıştır. İş parçası olarak üretimde sıkça kullanılmakta olan GG25 ve GGG40 standartlı dökme demir malzemeler belirlenmiştir. Taguchi tekniği kullanılarak en yüksek takım ömrü değerlerini veren optimum kontrol faktörleri belirlenmiştir. Ayrıca her deneyden sonra matkap uçlarındaki aşınma durumları ve tipleri takım ölçme ve ayarlama makinası yardımı ile tespit edilmiştir. GGG40 malzemenin GG25 standartlı malzemeye göre, matkap ucunda daha çok aşınmaya sebebiyet verdiği ve matkap ucunun çapı arttıkça aşınma miktarlarında da arttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Matkap ucu, Karbür Takım, Takım aşınması, Aşınma tipleri, Taguchi metodu

### Optimization of Process Parameters in Drilling of Cast Iron Materials with Carbide Drills

#### Abstract

There is a direct relationship between tool wear and part production cost efficiency. Wear on the tools is a main factor that directly affects the quality of production. In this study, the effect of different diameters of drill and cutting parameters on tool wear was investigated. 20 test repetitions were performed with 9 different combinations of tools with different diameters and different cutting parameters. The effects of parameters on tool wear were observed. Solid carbide tools with a diameter of 6.8 mm, 9 mm and 9.6 mm and cast iron materials of GG25 and GGG40 standard were used as work pieces in experimental studies. The design of the experiment was determined by Taguchi method and after each experiment, the wear conditions and types of drill bits were by using of a tool measurement and adjustment machine. It has been determined that GGG40 material causes more wear on the drill bit compared to the GG25 standard material and increases the amount of wear as the diameter of the drill bit increases.

**Keywords:** Drill bit, Carbide tools, Tool wear, Wear types, Taguchi method

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Oğuzcan GÜZELİPEK, oguzcan.guzelipek@gmail.com

## 1. GİRİŞ

Son zamanlarda imalat sektöründeki gelişen teknolojiler ve CNC (Computer Numeric Control) kullanımı sayesinde otomasyona geçilmesine rağmen kesme ve delik delme operasyonlarında hala çözülememiş problemler mevcuttur. Kesici takımın aşınması ve kırılması bu duruma en iyi örnektir. Aşınma, malzemelerin yüzeyinden mekanik etkiler nedeni ile değişik boyutlarda parçacıkların istenmeyen şekilde ayrılması sebebiyle oluşan değişiklik ya da değişiklikler olarak tanımlanır. Bununla beraber, eskimeye sebep olan elektriksel, fiziksel ve kimyasal etkenlerle yüzeyden büyük boyuttaki parçaların kırılması da aşınma kavramı içerisinde yer alır. Belirli bir seviyeden sonra kesici takımın artan aşınma miktarı ile (özellikle yan yüzey aşınması) takıma etki eden direnç kuvvetleri ve talaş kaldırma kuvvetleri artar ve bu da kırılmaya sebep olmaktadır. Bu durum operatöre, tezgâha ve iş parçasına, kırılan matkap ucunun yüksek hızlarda çarpması ile büyük zararlar verebilmektedir. Ayrıca, aşınmayla birlikte beklenen yüzey kalitesi ve hassasiyeti elde edilemez. Kesme işlemi sırasında meydana gelen kuvvet, sürtünme, ısı gibi etkenlerden dolayı kesici takım uçlarında ve yan yüzeylerinde aşınmaya yol açacaktır ve bu aşınmalar yüzey kalitesinde istenmeyen bozukluklara yol açacaktır. Bu yüzden, bilmeyen ya da değiştirilmeyen kesici takım üretim ve takım maliyetlerinin artışına sebebiyet verecektir [1].

Kesici takımların ömrü bittikten sonra değiştirilmelidir. Bunun için takımların ömrünü bilmek gerekmektedir. Talaş kaldırma sırasında kesme parametrelerinin ve değişken yüklerin kesici uçların ömrünü nasıl etkilediğinin araştırıldığı bir çalışmada; sabit ve değişken yük şartları altında talaş kaldırma işlemleri uygulanmıştır. Test sistemi ile etki eden kesme kuvvetleri ölçülmüş ve kesici uç aşınmaları incelenerek takım ömürleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak, kesme hızı artışı ve değişken yüklemelerin takım ömrünü kötü etkilediği görülmüştür [2]. Her takımın malzemesi ve bu malzemelerin aşınma

durumları aynı olmadığından dolayı ömrü farklıdır. Bu yüzden, takımın ömrünü hesaplamak için yapılan deneylerde farklı kesme parametrelerinde (ilerleme miktarı, kesme derinliği, kesme hızı, vb.) kesici uçların ömürleri belirlenir ve en iyi sonucu veren kesme parametresinin işlenen parça üzerinde oluşturacağı yüzey pürüzlülüğü bilinmelidir. İşlenen parçaların istenilen verimde çalışabilmesi için en önemli etkenlerden biri parça yüzey kalitesidir ve belirlenmesinde yüzey pürüzlülüğü faktörü kullanılır. Yüzey pürüzlülüğünü kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği gibi parametreler doğrudan etkiler [3,4]. Kesme şartları iyi belirlenemediği zaman, yorulma ve korozyon dayanımının azalmasına, çentik etkisine neden olarak çatlaklar oluşmasına ve yüzey kalitesinin kötüleşmesine sebep olmaktadır. Gelişmiş ülkelerin bile aşınma ile ortaya çıkan zararın ekonomik değerinin o ülkenin GSMF'nin %7'sine eşdeğer olduğu ön görülmektedir [5].

Deney tasarımında faktör ve faktör seviyeleri arttıkça deney sayısı da artmaktadır. Bu durum deney maliyetlerinin artmasına ve deney sürelerinin uzamasına neden olmaktadır. Bu sorunu çözmek için kesirli faktöriyel deney tasarımı geliştirilmiştir. Kesirli deney tasarımı deney sayılarını azaltmakla birlikte farklı araştırmacıların aynı kesirli deneylerde farklı seviye seçebilmeleri nedeniyle farklı sonuçlar elde etmelerine neden olmaktadır. Bu sorunu Genichi Taguchi geliştirmiş olduğu standart ortogonal diziler ile çözmüştür. Böylelikle farklı araştırmacılar aynı faktör ve seviyeleri için aynı ortogonal çizelgeleri kullanma imkanı bulmuştur. Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiş olan bu yönteme Taguchi Metodu denmektedir. Deneysel tasarımdan farklı olarak Taguchi Metodu, deney faktörlerini kontrol edilebilir ve kontrol edilemez faktörler olarak ikiye ayırmıştır. Taguchi, kontrol edilemeyen ya da kontrolü zor faktörlerin deney çıktılarına etkilerini azaltmak için üç adet logaritmik Sinyal/Gürültü (Signal to Noise) fonksiyonu geliştirmiştir. Fonksiyonun seçimi: Deneyde istenen çıktıların durumuna göre en küçük-en iyi, en büyük-en iyi ve nominal-en iyi olacak şekilde uygun fonksiyon seçilir. Örneğin

yüzey pürüzlülüğü deneylerinde en küçük-en iyi fonksiyon seçilmektedir. Taguchi S/N fonksiyonlarının kullanılabilmesi için kontrol edilemeyen faktörlerin en az iki tekrarlı yapılması gerektiğini belirtmiştir [6-9].

Deney tasarımının amacı ulaşılmak istenen veya araştırılmak istenen sonuçların ve bu sonuçlardan ortaya çıkan sapmaların doğru bir şekilde analiz etmek için kullanılan deney grubunu planlamaktır. Deney tasarım yöntemleri yalnızca istatistiksel yaklaşım değildir. Tüm Ar-Ge çalışmalarında kullanılabilir, kalite arttırıcı maliyetleri en aza indiren, verilerin doğruluğunu sağlamlaştıran, tüm kalite tekniklerini destekleyen ve tamamlayan tekniklerden oluşmaktadır [10]. Deney tasarımlarının uygulamada sundukları avantajlar ürün kalitesinde ve performansında artış olması, elde olan kaynakların daha verimli kullanılması, Ar-Ge çalışmalarında zamandan tasarruf sağlanması, ürünün veya sürecin kalitesel özelliklerini iyileştirilmesi şeklinde sıralanabilir. Deney tasarımı metotları yüz yılbaşında tarımsal çalışmalarda kullanılarak Fischer tarafından geliştirilmiştir [11]. Ancak bu tarz deney tasarım modelleri endüstriyel alanlarda başarılı olamayan modellerdir.

Sistemin karmaşıklaşması ile artan unsurların sayısı yapılması gereken test sayısını da arttırmaktadır. Genichi Taguchi, ismi ile bütünleşen yöntemi ile deneylerin yapılması ve değerlendirilmesinde verimliliği arttıran bir çözüm geliştirmiştir [12]. Bu çözüm sayesinde önceden yapılmış detaylı bir analiz ve değerlendirme ile birlikte deney sayısı önemli ölçüde azalmış olur.

Diğer kesme operasyonlarındaki gibi delme operasyonlarında da kesici takımın aşınmasının operasyon esnasında gözlemlenmesi ve kalıcı bir hasardan önce süreci durdurarak oluşmuş sorunun giderilmesi, çözüme kavuşması gereken bir problem olmuştur. Tam otomasyon ile çalışan üretim tesislerinde takımların aşınmasını operasyon esnasında gözlemek, aşınan matkap takımının kırılmadan önce değiştirilip, malzeme üzerindeki problemi yok etme bakımından oldukça önem sarf eden bir husustur. Torna, delik delme, taşlama gibi metal şekillendirme ve kesme

operasyonları içerisinde, uygulanan işlemlerin tekrarı dikkate alındığında, matkap ile delme işlemi bu operasyonlar içerisinde en büyük öneme sahip olup, delme işlemi, genellikle başka bir kesme operasyonunun da ilk adımını oluşturmaktadır. Aynı zamanda en fazla kullanılan operasyonlardan birisidir. Delik delme işlemi, genelde talaşlı imalat prosesinin son aşamasıdır.

Matkap etrafında meydana gelen metal talaş kalınlığı, iş parçası talaşının akışını belirleyen bir faktördür. Matkap ile iş parçası arasında oluşan sürtünme sonucu yüzeyde oluşan sıcaklığın yetersiz ve dönme ekseninde kesme hızının sıfır olması, delik delme işlemindeki en büyük sorundur. Bunun üzerine matkap formunu ve malzemelerin iyileştirilmesi ile ilgili araştırmalar ve çalışmalar yapılmaktadır [5].

Matkap ile delme operasyonu, talaşlı imalat operasyonları içerisinde en sık kullanılan operasyonlardan biridir ve talaş kaldırma operasyonlarının yaklaşık %33'ünü oluşturur. Ayrıca, delik delme işlemlerinde yaklaşık %25'e yakın bir zaman harcanmaktadır. Dolayısıyla, delik delme operasyonunda sağlanabilecek performans iyileştirmeleri (parametrelerin optimizasyonu ve matkap takımlarının veriminin artırılması) maliyetlere ve niteliklerine önemli derecede fayda sağlayacaktır. Bu bağlamda geliştirilen en verimli metot, taban malzeme olarak uzun süredir kullanılmakta olan ve seçilen yüksek hız çeliklerinin özelliklerini ince sert seramik kaplamalar ile desteklemektir. Özellikle TiN ve TiAlN kaplamaların sıklıkla kullanılmaya başlanmasına rağmen, kaplanmamış matkap takımlarına kıyasla bu kazanımlarının açık şekilde ortaya konmasında hala eksikler vardır. Doğru kaplama seçimi ile beraber en uygun değerli kesme ve ilerleme hızlarının belirlenmesi de aşınma miktarlarının azalmasına ve endüstriyel işletmelerde verimliliğin artmasına sebep olacaktır [10].

İlhan ve arkadaşının Taguchi metoduyla yaptığı bir çalışmada optimum kesme parametrelerini belirlenmiş ve sonuçlar Varyans Analizi ile değerlendirilmiştir. S/G oranına Varyans Analizi

uygulanarak kesme parametreleri ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki etkileşim incelenmiştir. Analize göre besleme oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi %95 olarak belirlenmiştir [13].

Yapılan bir başka çalışmada Tugay ve arkadaşları AISI 316 paslanmaz çelik üzerinde en uygun kesme değişkenlerini belirlemek için Taguchi metodu kullanılmıştır. Çalışma sonuçları Varyans Analizi ile değerlendirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli unsur %39,14 yüzdeyle kesme aleti olarak belirlenmiştir ve besleme oranının %82,77 yüzdesiyle itme kuvvetini etkilediği belirlenmiştir. Optimum kombinasyonlarda yüzey pürüzlülüğü ile alakalı kalite kayıpları çok düşük (%6) olduğu gözlenmiştir [14].

Bu çalışma, Taguchi metodu ile deney tasarımı yapılan, sık kullanılan metal kesme operasyonlarından olan delik delme operasyonunda kullanılan karbür esaslı kesici takım uçlarının dökme demir malzemeleri delme işleminde; her deneyden sonra takım ölçme ve ayarlama makinasında incelendikten sonra aşınma durumunun ve tiplerinin belirlenmesini ve deneysel tasarım sonrasındaki delik delme işlemlerinin analizlerinin yapılmasını amaçlamaktadır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Kullanılan Malzemeler ve Ekipman

Deneylerde kullanılan iş parçaları, yarı hammadde olarak üretilip TOTOMAK A.Ş.'de işlenen lamel grafitli dökme demir (GG25) ve küresel grafitli dökme demir (GGG40) malzemelerdir. Bu malzemelerin seçilmesinin sebebi karbür matkap uçları ile işlenebilirliğinin yüksek olmasıdır. Çizelge 1 ve Çizelge 2'de GG25 standartlı malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Çizelge 3 ve Çizelge 4'te ise GGG40 standartlı malzemenin mekanik ve kimyasal özellikleri görülmektedir.

Çizelge 1. GG25 standartlı malzemenin mekanik özellikleri

<b>Çekme Mukavemeti</b>	$\sigma_m$	250	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Akma Mukavemeti</b>	$\sigma_{0.20B}$	163	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Brinell Sertliği</b>	HB <sub>30</sub>	180-240	[Kg/mm <sup>2</sup> ]
<b>Elastik Modülü</b>	E <sub>o</sub>	120	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Yorgunluk Sınırı</b>	R <sub>m</sub>	115	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Darbe Dayanımı</b>	Av	28	[%]
<b>Sıkıştırma Dayanımı</b>	$\sigma_{dB}$	950	[N/mm <sup>2</sup> ]

Çizelge 2. GG25 standartlı malzemenin kimyasal özellikleri

<b>Karbon</b>	C	2,9-3,65	[%]
<b>Silisyum</b>	Si	1,8-2,9	[%]
<b>Magnezyum</b>	Mn	0,5-0,7	[%]
<b>Sülfür</b>	S	0,10 maks.	[%]
<b>Fosfor</b>	P	0,30 maks.	[%]
<b>Demir</b>	Fe	Geriye kalan	

Çizelge 3. GGG 40 standartlı malzemenin mekanik özellikleri

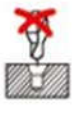
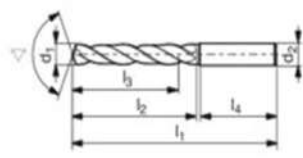
<b>Çekme Mukavemeti</b>	$\sigma_m$	400	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Akma Mukavemeti</b>	$\sigma_{0.20B}$	250	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Brinell Sertliği</b>	HB <sub>30</sub>	135-180	[Kg/mm <sup>2</sup> ]
<b>Esneklik Modülü</b>	E <sub>o</sub>	169	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Yorgunluk Sınırı</b>	R <sub>m</sub>	220	[N/mm <sup>2</sup> ]
<b>Darbe Dayanımı</b>	Av	10	[Joule]
<b>Sıkıştırma Dayanımı</b>	$\sigma_{dB}$	800	[N/mm <sup>2</sup> ]

**Çizelge 4.** GGG 40 standartlı malzemenin kimyasal özellikleri


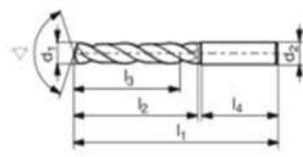
<b>Karbon</b>	C	3,4-3,85	[%]
<b>Silisyum</b>	Si	2,3-3,1	[%]
<b>Magnezyum</b>	Mn	0,1-0,3	[%]
<b>Sülfür</b>	S	0,02 maks.	[%]
<b>Fosfor</b>	P	0.10 maks.	[%]
<b>Demir</b>	Fe	Geriye kalan	

Bu çalışmada, talaşlı imalatta en çok kullanılan matkaplardan olan iki ağızlı helisel, 6,8 mm, 9 mm ve 9,6 mm çaplı karbür matkap uçları kullanılmıştır. Kullanılan matkap uçlarının teknik özellikleri ve geometrileri Çizelge 5, Çizelge 6 ve Çizelge 7’de verilmiştir.


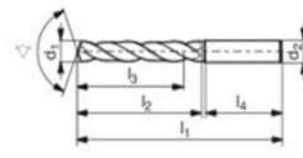
**Çizelge 5.** WNT.WPC-UNI.6,80.R.5D.IK.11609068 teknik özellikleri

$\leq 5xD$		$140^\circ$		$d_{1\ m7}$	6,8 mm
				$d_{2\ h6}$	8 mm
TiAIN	UNI	DIN 6535 HA		$l_1$	91 mm
				$l_2$	53 mm
				$l_4$	36 mm
				$l_3$	49 mm

**Çizelge 6.** WNT.WPC-UNI.9,00.R.5D.IK.11609090 teknik özellikleri

$\leq 5xD$		$140^\circ$		$d_{1\ m7}$	9 mm
				$d_{2\ h6}$	10 mm
TiAIN	UNI	DIN 6535 HA		$l_1$	103 mm
				$l_2$	61 mm
				$l_4$	40 mm
				$l_3$	49 mm

**Çizelge 7.** WNT.WPC-UNI.9,60.R.5D.IK.11609096 teknik özellikleri

$\leq 5xD$		$140^\circ$		$d_{1\ m7}$	9,6 mm
				$d_{2\ h6}$	10 mm
TiAIN	UNI	DIN 6535 HA		$l_1$	103 mm
				$l_2$	61 mm
				$l_4$	40 mm
				$l_3$	49 mm

Alınan numunelerin üzerinde delik delme operasyonunu uygulanması için kullanılan matkap tezgahının teknik özellikleri ise Çizelge 8'de verilmiştir. Matkap tezgâhı kayış kasnak sistemi ile çalışmaktadır.

**Çizelge 8.** EKÇELİK M-13 (1500) Matkap tezgâhı teknik özellikleri

<b>Motor Gücü</b>	0,55 Kw 1500 d/dk
<b>Matkap Devri</b>	4500 devir
<b>Bağlanabilecek Maksimum Takım Çapı</b>	16 mm
<b>Delme Derinlik Mesafesi</b>	100 mm
<b>Mors Mil Koniği</b>	B 16
<b>Tabla ile Mandren Arasındaki Maks. Yükseklik Mesafesi</b>	350 mm
<b>Sütun Mili ile Mandren Ucu Mesafesi</b>	170 mm
<b>Tabla Kullanım Alanı</b>	245 x 300
<b>Tabla T Kanal 3 Adet T Kanal Ölçü</b>	12 x 21 x 19

## 2.2. Taguchi L9 Deney Tasarımı (Design of Experiment With Taguchi L9)

Taguchi Deney Tasarımı metodu sonucu alınan deney sonuçları signal/noise (S/N) yani sinyal/gürültü oranına dönüştürülerek değerlendirilir. Bütün S/G oranlarında daha büyük olan en iyi deney sonucunu vermektedir. Böylece deneylerde kullanılan faktörlerin seviyelerinden en fazla Sinyal/gürültü oranına sahip değer en iyi performansı verecektir. Bundan ayrı olarak uygulanan varyans analizi (ANOVA) ile hangi işlem üzerinde hangi faktörün daha çok etkili olduğu istatistiksel olarak görülebilmektedir. Unsurların birbirine bağlı olmadan değerlendirilebilmesi ve bunun için de unsurların farklı seviyeleri için her test edilen koşulda aynı miktarda örnekleme yapılması dikkat edilmesi gereken bir noktadır [12].

Taguchi Deney Tasarımı metoduna göre bir çalışmada izlenecek adımlar aşağıdaki şekildedir [15]:

1. Faktörlerin seçimi ve aralarındaki etkileşimleri birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesi (sebebe sonuç diyagramı,

beyin fırtınası, akıl diyagramı gibi yöntemler kullanılarak).

2. Faktörler seviyelerinin belirlemek.
3. Doğru ortogonal matrisin seçilmesi.
4. Faktörlerin deney düzenindeki sütunlarla eşleştirmek.
5. Deneylerin önceki basamaklarda belirlenen biçimde uygulamak.
6. Sonuçların analizi (S/G oranı).
7. Onama deneylerinin yapılması.

Bu amaçla, faktörlerin belirlenmesi için yapılan çalışmalar incelenmiş ve takım aşınmasını etkileyen faktörler belirlenmiştir. Seviyeler belirlenirken kullanılan tezgah, üretim sektöründe çok fazla kullanılan takımlar, kesme hızları ve malzemeler göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Seviyeler ve faktör çeşitli deney tasarım matrislerini içeren ve Çizelge 9'da gösterilen ortogonal matris seçim çizelgesinden uygun tasarım matrisi seçilmiştir. Yapılan çalışmada aşınmaya etkileri olan matkap çapı, kesme hızı, ilerleme miktarı faktörlerinin her biri üç seviye belirlenirken malzeme cinsi için seviye belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan faktörler ve seviyeler Çizelge 10'da görülmektedir.



**Çizelge 9.** Taguchi ortogonal matris seçim çizelgesi

		Parametrelerin Sayısı (P)																													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Seviye Sayısı	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12	L12	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27	L27	L27	L27	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36	L36
	4	L'16	L'16	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50	L50
	6	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32	L32

**Çizelge 10.** Çalışmada kullanılan faktörler ve seviyeler

Seviyeler Faktörler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
<b>Matkap Çapı (A)</b>	6,8 mm <sub>(1)</sub>	9 mm <sub>(2)</sub>	9,6 mm <sub>(3)</sub>
<b>Kesme Hızı (Vc) (B)</b>	60 m/dk <sub>(1)</sub>	70 m/dk <sub>(2)</sub>	80 m/dk <sub>(3)</sub>
<b>İlerleme Hızı (f) (C)</b>	0,10 mm/dev <sub>(1)</sub>	0,15 mm/dev <sub>(2)</sub>	0,20 mm/dev <sub>(3)</sub>
<b>Malzeme Sertliği (Brinell Sertliği) (D)</b>	180-240 HB <sub>(1)</sub>	135-180 HB <sub>(2)</sub>	-

Çizelge 11'de Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal deney tasarım matrisi tanımlanmıştır. Kontrol faktörü olan matkap çapı, malzeme cinsi ve devir sayısı yerine A, B, C, D harflerini, kontrol unsurlarının seviyelerini belirlemek için 1, 2, 3 sayıları kullanılarak Çizelge 11, Çizelge 12 ile verilen matris formunda ifade edilmiştir.

**Çizelge 11.** Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal deney tasarım matrisinin tanımlanması

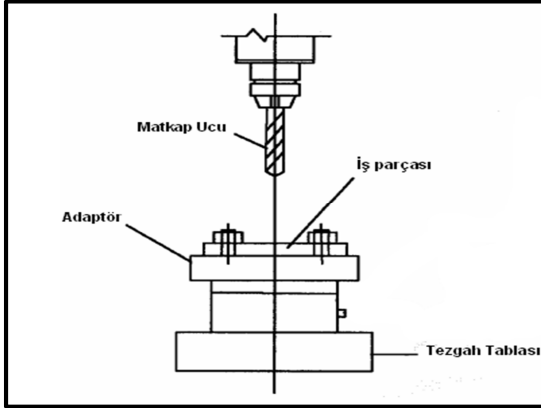
Deney Sırası	Matkap Çapı (A)mm	Kesme Hızı Vc (B)	İlerleme Hızı, f (C)	Malzeme Sertliği (D)
<b>Deney 1</b>	6,8 <sub>(1)</sub>	60 <sub>(1)</sub>	0,10 <sub>(1)</sub>	180-240HB <sub>(1)</sub>
<b>Deney 2</b>	6,8 <sub>(1)</sub>	70 <sub>(2)</sub>	0,15 <sub>(2)</sub>	135-180HB <sub>(2)</sub>
<b>Deney 3</b>	6,8 <sub>(1)</sub>	80 <sub>(3)</sub>	0,20 <sub>(3)</sub>	180-240HB <sub>(1)</sub>
<b>Deney 4</b>	9 <sub>(2)</sub>	60 <sub>(1)</sub>	0,15 <sub>(2)</sub>	135-180HB <sub>(2)</sub>
<b>Deney 5</b>	9 <sub>(2)</sub>	70 <sub>(2)</sub>	0,20 <sub>(3)</sub>	180-240HB <sub>(1)</sub>
<b>Deney 6</b>	9 <sub>(2)</sub>	80 <sub>(3)</sub>	0,10 <sub>(1)</sub>	135-180HB <sub>(2)</sub>
<b>Deney 7</b>	9,6 <sub>(3)</sub>	60 <sub>(1)</sub>	0,20 <sub>(3)</sub>	135-180HB <sub>(2)</sub>
<b>Deney 8</b>	9,6 <sub>(3)</sub>	70 <sub>(2)</sub>	0,10 <sub>(1)</sub>	180-240HB <sub>(1)</sub>
<b>Deney 9</b>	9,6 <sub>(3)</sub>	80 <sub>(3)</sub>	0,15 <sub>(2)</sub>	180-240HB <sub>(1)</sub>

**Çizelge 12.** Taguchi L<sub>9</sub> ortogonal deney tasarım matrisi

Deney No	Sütunlar			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Deneylerde ortaya çıkan değerler ile aşınma oranı ve tipi üzerine seviye ve unsurların etkisini görmek için Minitab 18 paket programı ile S/N yani S/G ve varyans analizi uygulanmıştır. Aşınma oranı ve S/G oranlarının hesaplanmasında, aşınma miktarı en düşük seviyeye indirilmeye çalışıldığından "en küçük en iyi" karakteristiği kullanılmıştır.

### 2.3. Deney Sistemi



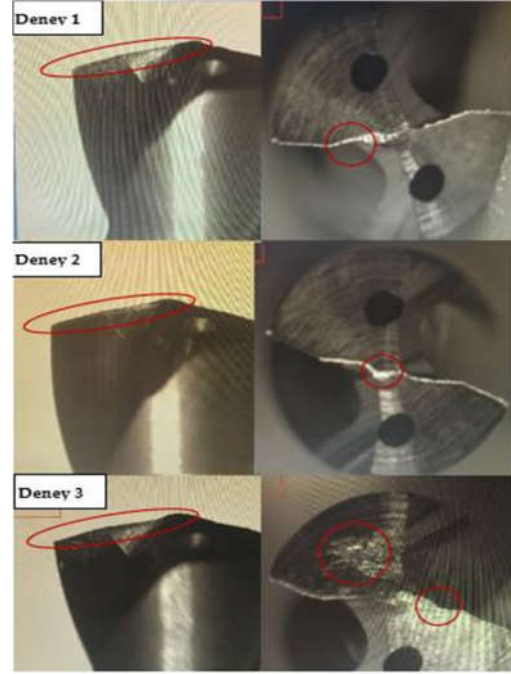
Şekil 1. Deney düzeneği

Delik delme operasyonu EKÇELİK M-13 adlı matkap tezgahında gerçekleştirilmiştir. Çizelge 11’de görüldüğü üzere dokuz adet deney gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için 20 defa 10 mm derinliğinde delme işlemi yapılmıştır. Toplamda 180 adet delme işlemi yapılmıştır. Deney sonuçları, S/G oranı ve tüm faktörlerin aşınma miktarı üzerine olan etkileri, Minitab 18 paket programıyla ölçülüp grafiksel hale getirilmiştir. Her 20 delikte bir çekilen fotoğraflarla takımlarda meydana gelen aşınmalar takım ölçme ve ayarlama makinasına adapte edilen kameralı görüntüleme sistemi ile görüntülenmiştir. Daha sonra, matkap uçlarının ağırlığı hassas terazi vasıtasıyla ölçülmüştür.

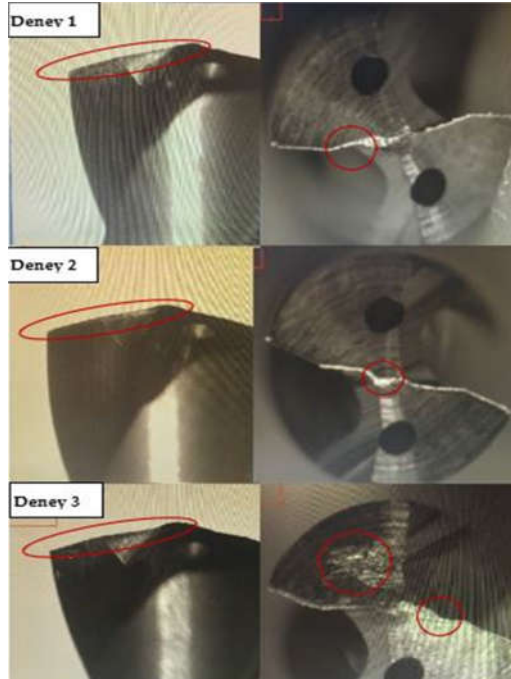
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 3.1. Kesici Takım Aşınmalarının Değerlendirilmesi

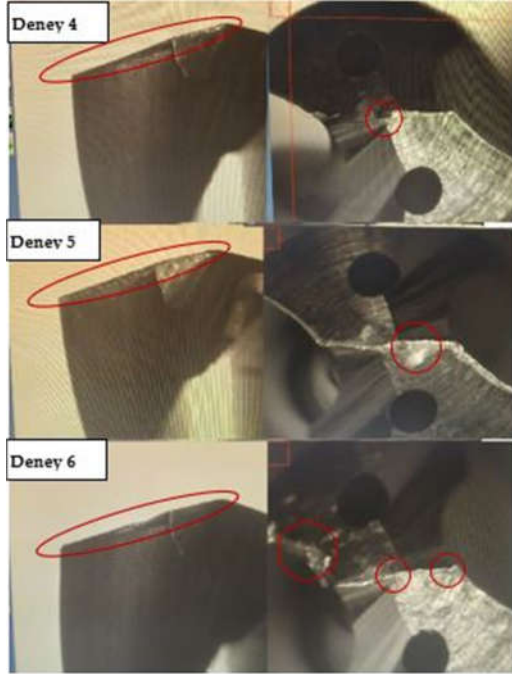
Takımların farklı çaplar, farklı ilerleme hızları ve kesme hızlarının kombinasyonları sonucu meydana gelen deformasyonlar genellikle serbest yüzey aşınması, kesici kenardan tanecik kopması, kesici uç aşınması olarak belirlenmiştir. Her deneye göre meydana gelen aşınma tipleri şekillerde verilmiş olup, aşınma miktarları ağırlıkça belirlenmiştir. Şekil 2’de kullanılmamış matkap uçları, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’te sırasıyla deneylerden sonra alınan kamera görüntüleri görülmektedir.



Şekil 2. Kullanılmamış Matkap Uçlarının görüntüleri



Şekil 3. Çapı 6,8 mm olan takımın deney sonrası görüntüleri

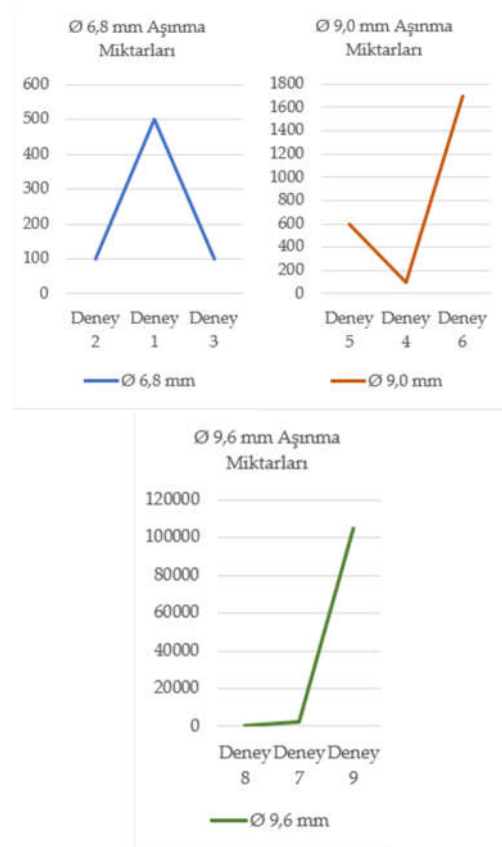


Şekil 4. Çapı 9,0 mm olan takımın deney sonrası görüntüleri



Şekil 5. Çapı 9,6 mm olan takımın deney sonrası görüntüleri

Çapı 6,8 mm olan takıma uygulanan deneyler Deneysel 1, Deneysel 2 ve Deneysel 3'tür. Çapı 9 mm olan takıma uygulanan deneyler ise Deneysel 4, Deneysel 5 ve Deneysel 6'dır. Çapı 9,6 mm olan takıma uygulanan deneyler ise Deneysel 7, Deneysel 8 ve Deneysel 9'dur (Şekil 6).



Şekil 6. Matkap uçlarındaki aşınma miktarları

Matkap uçlarının kullanılmamış ağırlıkları ve deneylerin sonunda ölçülen ağırlıkları Çizelge 13'de görülmektedir. Bu görüntülere (Şekil 3-5) göre, 6,8 mm çaplı matkap ucunda en az aşınma miktarı gözlemlenirken 9,6 mm çapa sahip matkap ucu en fazla aşınan takım olmuştur. Yan kesici kenar aşınması bütün takımlarda görülmüştür ve ilerleme miktarının artması ile orantılı olduğu tespit edilmiştir. Kesici uç aşınması bütün takımlarda görülmekle beraber en çok karşılaşılan aşınma türü kesici kenardan tanecik kopmasıdır ve 9 mm ve 9,6 mm çapa sahip matkap

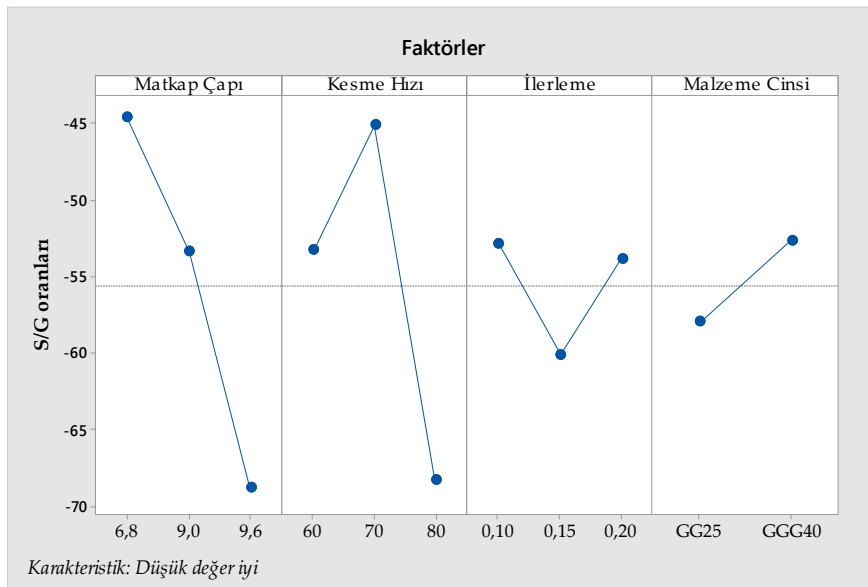
uçlarında fazlasıyla görülmektedir. Kesici kenardan tanecik kopmasının kesme hızının artması ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum kesme hızının artması ile takıma gelen yüklerin arttığının göstergesidir. Benzer çalışmalarda da kesme hızlarının matkap aşınmasını az miktarda etkilediği bilinmektedir. Matkap uçlarının ağırlıklarının ölçümünde en çok ağırlık kaybına sebebiyet veren aşınma türü kesici kenardan tanecik kopması iken en az ağırlık kaybına yol açan aşınma türü kesici uç aşınması olmuştur. Literatürde, GGG 50 malzemelerde yapılan denemelerde genelde bütün takımlarda radyal ağız aşınması ve dış köşe aşınması gözlenmiştir ancak ilerlemede yapılan artışlarla en çok radyal ağız aşınmaları tespit edildiği bulguları mevcuttur [16]. Yapılan bu çalışmalarda farklı malzeme ve devirlerde yapılmış olsa da yapılan deneysel çalışmalarla benzer nitelikte sonuçlar vermektedir. Aynı şekilde başka bir malzeme üzerinde yapılan çalışmalarda yine karbür takımlarda kaplamalı ve kaplamasız olarak yapılan denemelerde daha düşük hızlarda yapılmış bir çalışma olmasına rağmen benzer aşınma trendleri görüldüğü belirtilmiştir [17]. Bu da yapılan çalışma ve taguchi metodu ile belirlenen değerlerimizin aynı zamanda elde edilen sonuçların doğruluğunu göstermektedir.

**Çizelge 13.** Matkap uçlarının deneyler sonucu ağırlık ölçümü

	İlk Ağırlık (g)	Son Ağırlık (g)	Ağırlık Kaybı (g)
6,8 mm çaptaki matkapın deney sonuçları	40,2117	40,2110	0,0007
9 mm çaptaki matkapın deney sonuçları	75,5309	75,5285	0,0024
9,6 mm çaptaki matkapın deney sonuçları	69,6416	69,5345	0,1071

### 3.2. Sinyal/Gürültü Oranı ve Varyans Analizi (S/N Ratio and ANOVA)

Yapılan çalışmaya konu olan matkap takımlarında görülen karakteristik değer aşınma miktarı olduğu için ve aşınma miktarının en az olması istendiği için deneylerin analizinde “düşük değer iyi” yaklaşımına göre hesaplanan S/G oranı kullanılacaktır. Şekil 7’de Taguchi L<sub>9</sub> Deney Tasarımına göre S/G oranları verilmiştir. Her unsur için belirlenen en yüksek S/G oranı en iyi deney sonucuna, yani aşınma miktarının en az olduğu sonucu belirtir.



**Şekil 7.** Tüm faktör ve seviyelerin S/G üzerine etkileri

Şekil 7'deki grafiklerde de görüldüğü gibi her bir faktör için S/G oranının en yüksek olduğu seviyeler matkap çapında 6,8 mm, kesme hızında 70 m/dak, ilerlemede 0,10 mm/dev, malzeme cinsinde ise GGG40 olarak gözükmemektedir. Böylelikle, en uygun nokta olarak tavsiye edilen kombinasyon 6,8 mm çaplı matkap ucu ile 70 m/dak kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme ile GGG40 standartlı malzeme olmaktadır.

Varyans analizinde hedeflenen, incelenen unsurların, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerini (aşınma miktarı) hangi miktarda etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe sebep olduklarını göstermektedir. Çizelge 14'de deney tasarımına göre varyans analizi sonuçları verilmiştir.

**Çizelge 14.** Varyans analiz sonuçları

	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı	Ortalama Karelerin Toplamı	F	Faktör Etkisi (%)
Matkap Çapı	2	897,6	438,17	0,35	28,27%
Kesme Hızı	2	827,91	402,87	0,32	26,08%
İlerleme	2	1265,41	1265,75	0,06	31,94%
Malzeme Cinsi	1	133,38	130,38	0,07	13,85%
Hatalar	1	50,69	36,69		2,86%
Toplam	8	3174,99			100,00%

Analiz sonuçlarının istatistiksel olarak doğruluğu da test edilir. Buna göre ilk olarak S/G oranının toplam değişkenliğini belirten SST değeri (toplam karelerin toplamı) hesaplanır. SST değeri üç unsurun ayrı ayrı olarak karelerinin toplamı değerleri (SSA, SSB ve SSC) ile hata payının karelerinin toplamı olan SSe değerinin toplamından oluşmaktadır. Her unsurun karelerinin toplamının ayrı olarak hesaplanması sonucu ortaya çıkan sonuçlar Çizelge 14'de gösterilmiştir. Çizelgeye göre yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi sonucunda matkap çapı (%28,27), kesme hızı (%26,08), ilerleme (%31,94), malzeme cinsi (%13,85) ve hata (%2,86) faktörlerinin etkileri belirtilmiştir. Bu verilere göre ilerleme faktörü yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktördür.

#### 4. SONUÇ

GG25 ve GGG40 malzemelerin farklı çaplarda takımlarla işlenmesinde;

1. Bütün takımlarda birden fazla aşınma türü görülmüştür. Aşınma tipleri, serbest yüzey aşınması, kesici uç aşınması ve kesme kenarından tanecik kopmasıdır.

2. Kesici kenardan tanecik kopması, en çok çapı 9,6 mm olan takımda görülmüştür.
3. GGG40 malzemenin GG25 standartlı malzemeye göre, matkap ucunda daha çok aşınmaya sebebiyet verdiği görülmüştür.
4. Çapı 6,8 mm olan takımda 3 deney sonunda 700 mikrogramlık aşınma, çapı 9 mm olan takımda 3 deney sonunda 2400 mikrogramlık aşınma ve çapı 9,6 mm olan takımda ise 3 deney sonunda 107100 mikrogramlık aşınma olduğu ölçülmüştür. Matkap ucunun çapı arttıkça aşınma miktarlarında da artış gözlemlenmiştir.
5. Kesici kenardan tanecik kopması kesici takım çapının ve ilerlemenin artışına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir.
6. 9,6 mm çapa sahip takımda aşınmanın yüksek oluşu fotoğraflarda da görüldüğü üzere parçacık kopmasından kaynaklıdır.
7. Deneyler incelendiğinde, sıkça görülen aşınma tiplerinden biri olan serbest yüzey aşınması her deney sonu takım ölçme ve ayarlama makinası ile gözlenmiştir. Bir diğer aşınma tiplerinden olan tanecik kopması/çentiklenmesi Deney1, Deney 6,

Deney 7 ve Deney 8'de görülmüştür. Kesici uç aşınması ise Deney 4, Deney 5 ve Deney 9 da gözlemlenmiştir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Uluğ, D., 2014. Kaplamalı ve Kaplamasız Sementit Karbür Takımlar için Taylor Takım Ömrü Modelindeki “n” Üstel Değerinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
2. İşbilir, Ö., 2008. Talaş Kaldırmada Değişken Yükleminin Takım Ömrüne Etkisinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
3. Karayel, B., Nalvant, M., 2014. Ç4140 Malzemesinin Tornalamasında İlerleme, Kesme Hızı ve Kesici Takımın Yüzey Pürüzlülüğü, Takım Ömrü ve Aşınmaya Etkileri, Makine Teknolojileri Dergisi, 11(3), 11-26.
4. Tekelsan, Ö., Gerger, N., 2008. AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüklerinin Araştırılması, BAÜ FBE Dergisi, 10, 3-12.
5. Ertunç, H.M., 2001. Kesici Takımların Aşınmasını Gözlemlene Üzerine Yapılan Çalışmalar, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7, 55-62.
6. Kuram, E., Özcelik, B., 2017. Optimization of Machining Parameters During Micro-milling of ti6al4v Titanium Alloy and Inconel 718 Materials Using Taguchi Method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(2), 228–242.
7. Rathod, B.S., Khedkar, N.K., Jatti, V.K.S., 2014. Optimization of Turning Process Parameters for Surface Roughness and MRR Based on the Taguchi Method During Machining of Inconel-718. International Journal of Applied Engineering Research, 9(1), 83–92.
8. Roy, R.K., 2010. A Primer on the Taguchi Method, 2<sup>nd</sup> Edition, Society of Manufacturing Engineers, Michigan.
9. Thirumalai, R., Senthilkumaar, J., Selvarani, P., Ramesh, S., 2013. Machining Characteristics of Inconel 718 Under Several Cutting Conditions Based on Taguchi Method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 227(9), 1889-1897.
10. Bayraktar, Ş., Siyambaş, Y., Turgut, Y., 2017. Delik Delme Prosesi: Bir Araştırma, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2), 120-130.
11. Montgomery, D.C., 2001. Design and Analysis of Experiments, 5. Baskı, John Wiley, Wiley Sons, New York.
12. Şirvancı, M., 1997. Kalite İçin Deney Tasarımı “Taguchi Yaklaşımı”, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama San. ve Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
13. Asiltürk, İ., Akkuş, İ., 2011. Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning Using the Taguchi Method. Measurement, 44, 1697-1704.
14. Kıvak, T., Samtaş, G., Çiçek, A., 2012. Taguchi Method Based Optimisation of Drilling Parameters in Drilling of AISI 316 Steel with PVD Monolayer and Multilayer Coated HSS Drills. Measurement, 45(6), 1547-1557.
15. Ross, P.J., 1989. Taguchi Techniques for Quality Engineering, Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design, McGraw-Hill International Book Company, New York.
16. Yavuz, M., Gökçe, H., Şeker, U., 2017. Matkap Geometrisinin Takım Aşınması ve Talaş Oluşumu Üzerine Etkisinin Araştırılması, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(1), 1-8.
17. Sharif, S., Rahim, E.A., 2007. Performance of Coated- and Uncoated-carbide Tools When Drilling Titanium Alloy, Journal of Materials Processing Technology, 185, 72–76.

## Yaya Yollarında Kullanılan Farklı Zemin Döşeme Malzemelerinin Kullanım Performanslarının Belirlenmesi

Ali SARIŞIK<sup>\*1</sup>, Songül CAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa

Geliş tarihi: 11.02.2020

Kabul tarihi: 15.05.2020

### Öz

Bu çalışma, inşaat sektöründe kullanılan döşeme malzemelerinin kullanım alanlarındaki performanslarının belirlenmesi için yeni bir deney yöntemi olan bilye düşürme cihazı kullanılarak yapılan bir araştırmayı kapsamaktadır. Deneysel çalışmalarda zemin döşemesinde yaygın olarak kullanılan 4 farklı doğal taş, beton ve asfalt malzemeleri tercih edilmiştir. Bu çalışma üç bölümden oluşmaktadır: (1) bilye düşürme test cihazı kullanılarak malzemelerin, kopma enerjisi ve çarpma dayanımı değerlerinin belirlenmesi; (2) Griffith teorisi ile kırılma gerilmesinin hesaplanması ve (3) verilerin istatistiksel varyans analizi (ANOVA) ve K-ortalamalar kümeleme yöntemi ile sınıflandırılmasından oluşmaktadır. Bu deneylerden elde edilen veriler yardımıyla malzemelerin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesi istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile kırılma potansiyeli indeksi belirlenmiştir. Malzemelerin belirlenen istatistiksel analiz sonuçları dikkate alınarak, kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesi sınıflandırılmış, kullanım alanlarındaki performansları belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, kırılma potansiyeli açısından beton örnekleri hariç sırasıyla; asfalt, granit, kireçtaşı, mermer ve bazalt örnekleri döşeme malzemesi olarak kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin döşeme malzemesi, Kopma enerjisi, Çarpma dayanımı, Kırılma gerilmesi, Kullanım performansı

### Determination of the Usage Performance of Different Flooring Materials Used on Pedestrian Roads

#### Abstract

This study includes research conducted with the impact strength test which is a new test method for determining the performances of the flooring materials used in the construction industry. In experiment studies, 4 different natural stone, concrete and asphalt materials were used, which are widely used in flooring. This study consists of 3 episodes; (1) Determining the values of materials of rupture energy and impact strength by using ball drop test equipment; (2) Calculating of breaking stress by using Griffith theory and (3) Statically analysis of variance (ANOVA) and classification ok K-average clustering method. By using statically K average clusture method and breaking potential index; rupture energy, impact strength and breaking stress of materials was determined by helping obtained data. Taking into account of the determined statistical analysis results of the materials, the rupture energy, impact strength

---

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ali SARIŞIK, sariisikali@gmail.com

and breaking stress have been classified and their performance in the areas of usage has been determined. As a result of the analysis, except for concrete samples in term of breaking potential, respectively; asphalt, granite, limestone, marble and basalt samples can be used as flooring materials.

**Keyword:** Floor covering materials, Rapture energy, Impact strength, Fracture stress, Usage performance

## 1. GİRİŞ

Ülke nüfuslarının sürekli artması yeni yerleşim yerlerine olan ihtiyacı da beraberinde getirmektedir. Bir ülkenin gelişmişlik düzeyi, yerleşim yerleri olan yaya yolları ve yeşil alanlarda yapılan yaya içi yolların kaplanmasıdır. Kaplama yüzeyindeki yağış suları, enine eğimle kenarlara akıtılarak uzaklaştırılabildiği gibi, yolun üstyapısı geçirimsiz inşa edilerek de daha hızlı bir şekilde uzaklaştırılabilir. Park ve bahçelerde, cadde ve sokaklarda, gezinti yolları ve dinlenme alanlarının tabanları doğal taş, beton, küp taşlar ve asfalt gibi birçok malzeme ile kaplanmaktadır.

Doğal taş seçimi yapılırken kullanım yerlerine ve kullanım alanlarına uygun boyutlu malzeme seçimi yapılmalıdır. Doğal taşın boyut olarak uygun olup olmadığının belirlenmesinde ise kalite kontrol rol oynamaktadır [1-4]. Doğal taş blokları, ocaktan alınıp üretildikten sonra son ürün aşamasına kadar ortaya çıkan plaka, levha ve fayansların kullanım yerlerine uygun seçilip seçilmediği kalite kontrol ile belirlenebilmektedir [5]. İç ve dış mekanlarda; kaplama ve zemin döşemesi olarak kullanılan doğal taşların, çarpmaya karşı dayanıklılığının belirlenmesi piyasa için önem arz etmektedir. Kaplama ve zemin döşemesi olarak kullanılan doğal taş nihai ürünlerinin, kırılma riskini asgari seviyeye indirmek için doğal taş plakalarının kalınlığının belirlenmesi gerekmektedir.

Literatür çalışmalarına bakıldığında; doğal taşların fiziko-mekanik özellikleri ve çevre etkileşim özellikleri dikkate alınarak, kullanım alanları ve sınıflandırması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [6-10].

Kullanım ömrünün uzun sürmesi, renk ve desen çeşitliliği gibi nedenlerden dolayı doğal taşlar tercih edilmektedir. Aksaray yaylak granitlerinin kaplama olarak değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmada mekanik özellikler incelenmiştir.

Yaylak granitlerinin TS 6234'e göre kaplama taşı olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Granitler çevre ve atmosfer koşullarına karşı dayanıklı, paslanmaz, renk- desen çeşitliliğinin fazla olması, granit plakaların kenar ve köşelerinin düzeltme sırasında çatlamaması gibi avantajlardan dolayı tercih edilmektedir [11].

Granitler dış ortam şartlarına ve aşınmaya karşı dayanıklı, iyi cila tutma özelliğine sahip, renklerini ve parlaklıklarını uzun süre koruyan malzemeler olması sebebiyle bordür, döşeme kaplaması, merdiven, duvar kaplaması olarak tercih edilmektedir [12-13].

Birçok araştırmacının yaptıkları çalışmalarda, doğal taş örneklerinin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve farklı bir cihaz ile de sıçrama katsayısı değerlerinin belirlenmesi için bir deney yöntemi geliştirmeye çalışılmıştır [14-18]. Bu çalışmada, zemin döşeme malzemelerinin kopma enerjisi ve çarpma dayanımı verilerinden yararlanılarak, kırılma gerilmesi belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak, istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile kırılma potansiyeli indeksi belirlenmiştir. Ayrıca, yaya yollarında kullanılan farklı doğal taş örneklerinin beton ve asfalt malzemeleri performansları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Materyal

Bu çalışmada, inşaat sektöründe, özellikle zemin döşemesi ve kaplaması olarak kullanılan mermer, kireçtaşı, bazalt, granit, beton ve asfalt seçilmiştir. Doğal taş örnekleri piyasada en çok kullanılan Afyon mermeri, Karacadağ Bazaltı, Bilecik Kireçtaşı ve Yaylak Graniti kullanılmıştır. Beton (Poroz beton) için gerekli olan çimento ve agrega oranı, karışım suyunun çimento miktarına oranı, betonun dayanımını etkilemektedir. Beton (Poroz



beton) örnekleri ise su/çimento oranı 0,5 olan, farklı tane boyutlarında asidik ponza içerikli %1'i oranında süper akışkanlaştırıcı katkıdır [19]. Asfalt malzeme olarak da bitümlü sıcak karışım asfalt tercih edilmiştir [20]. Çizelge 1'de doğal taşların örnek kodları, plaka boyutları, yüzey işlem metodu ve ticari isimleri verilmektedir. Çalışma kapsamında toplamda 36 örnek (6 farklı malzeme x 6 adet örnek) üzerinde çarpma dayanımı deneyleri yapılmıştır.

**Çizelge 1.** Deneyde kullanılan malzemelerin örnek kodları, plaka boyutları ve ticari isimleri

Ticari İsim	Kod	Plaka Boyutu (mm)
Mermer	D1	200 × 200 × 30
Bazalt	D2	200 × 200 × 30
Granit	D3	200 × 200 × 30
Kireçtaşı	D4	200 × 200 × 30
Asfalt	A1	100 (D) x30 (h)
Beton (Poroz beton)	B1	100 x 100 x 30

## 2.2. Deneysel Çalışmalar

Zemin döşeme malzemelerinin kontrolü için TS EN 14158 standardına göre çarpma etkisi ile kopma enerjisi bilye düşürme test cihazı kullanılarak test edilmiştir [21]. Malzeme örnekleri sabit kütleye ulaşmaya kadar ( $70 \pm 5$ ) °C sıcaklıkta kurutulmuştur. ( $24 \pm 2$ ) h aralığında bulunan iki tartım arasındaki fark, ilk kütlenin %0,1'inden büyük değilse sabit kütleye erişilmiş olduğu varsayılır. Bilye düşürme test cihazı, 1043 g ağırlığına sahip, zemini kum ile doldurulmuş bir hazne, çelik bir bilye ve bu çelik bilyeye bağlı yüksekliği ayarlanabilen bir bilye yatağından oluşmaktadır (Şekil 1). Çarpma dayanımı deneyi gerçekleştirilirken ilk olarak; çelik bilye 0-100 cm yükseklikten bırakılarak, kumlu zemine yerleştirilmiş olarak bulunan malzemelerin üzerine bırakılmaktadır. Test edilecek 6 numuneden biri "kontrol numunesi" olarak seçilmektedir. Numunenin kırılmaması halinde, düşüş yüksekliği kırılma gerçekleşene kadar 50 mm artırılır. Kontrol numunesinin kırıldığı yükseklik (ht) kaydedilir. Bu deney diğer beş numune ile  $h_i = (ht - 150)$  mm ve en az 100 mm'lik başlangıç

yüksekliğinden başlanarak tekrarlanır. Her bir numune için kopma yüksekliği kaydedilir. Numunenin ilk çarpmada kırılması halinde, sonuç geçersiz kabul edilir.



**Şekil 1.** Çarpma dayanımı test cihazı

Bilye düşürme deney yöntemi Şekil 2'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Öncelikle, örnekler kumlu zemin üzerinde bulunan işaretli alana yerleştirilmiştir. Yapılan ön denemeler neticesinde, bilyenin düşme yüksekliği 25 cm olarak ayarlanmış ve bu yüksekliğe bağlı düşüş gerçekleştirilmiştir. Bilyenin ilk düşürülmesi sonucunda, ok ile belirtilen alanda bir iz oluşmuştur. 6. vuruş sonrası 25 cm yükseklikten bırakılan bilye ile numune yüzeyindeki iz artmıştır. Kırılmanın gerçekleşebilmesi için bilyenin düşme yüksekliği 5 cm artırılarak, 30 cm'e çıkarılmıştır. Bilyenin düşme yüksekliğinin 30 cm olarak ayarlanması sonucunda; 3. vuruşta numune çatlamış ve 4. vuruşta ise numune kırılmıştır.



Şekil 2. Çarpma etkisi ile kopma enerjisi deneyinde örnek kırılma şekli

Malzemelerin kopma enerjisi TS EN 14158 standardına göre aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak hesaplanmıştır (Eşitlik 1-4).

$$W=m \times g \times h \quad (1)$$

W: Kopma enerjisi (Nm, joule),  
h: Çelik bilyenin kopma yüksekliği (m)'dir.  
g: Yer çekimi ivmesi (9,806 m/s<sup>2</sup>),  
m: Çelik bilyenin kütlesi (kg)' dir.

Sarışık (2012) tarafından doğal taşların çarpma dayanımının aşağıdaki bağıntılardan yararlanılarak hesaplanması öngörülmüştür.

$$\text{ÇD} = \frac{W}{V} \quad (2)$$

Burada;

ÇD: Çarpma dayanımı, N/mm<sup>2</sup>, MPa/10<sup>-3</sup>,(kPa)  
V: Deney örneğinin hacmi, (mm<sup>3</sup>),  
W: Toplam darbe işi, (N x mm)' dir.

$$W=W_1 +W_2+W_n=G.h_1+G.h_2+G.h_n \quad (3)$$

Burada;

G: Çelik bilyenin ağırlığı, (N),  
h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub>, h<sub>n</sub>: Çelik bilyenin düşme yükseklikleri, (mm)'dir.

$$G=m \times g \quad (4)$$

g: Yerçekimi ivmesi, (m/s<sup>2</sup>),  
m: Çelik bilyenin kütlesi, (kg)'dir.

Asfalt ve beton numunelerinin boyutları farklıdır. Deney sonuçlarının karşılaştırılması için asfalt örnekleri için 0,2 ile beton numuneleri 0,25 düzeltme katsayısı ile çarpma dayanımı boyutuna dönüşüm sağlanmıştır (Eşitlik 5-6) [22].

$$\begin{aligned} \text{Asfalt çarpma dayanım}_{20 \times 20 \times 3 \text{cm}} &\cong \\ \text{Asfalt çarpma dayanım}_{10 \times 10 \times 3 \text{cm}} &*0,2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Beton çarpma dayanım}_{20 \times 20 \times 3 \text{cm}} &\cong \\ \text{Beton çarpma dayanım}_{10 \times 10 \times 3 \text{cm}} &*0,25 \end{aligned} \quad (6)$$

Griffith kırılma teorisi dikkate alınarak, malzemelerin çekme etkisinde çatlak ucunda oluşan maksimum kırılma gerilmesi Eşitlik 7'de gösterilmiştir. Griffith teorisine göre gevrek malzeme ince çatlaklar içerir. Çatlak uçlarında oluşan gerilmeler maksimum seviyeye gelince çatlaklar yayılır ve yayılan çatlak yüzeyinde enerji yığılmaları gözlemlenir. Oluşan bu enerji yığılmaları elastik enerjidir. Griffith teorisi ile çatlağın yayılmaya başladığı an ifade edilir.

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_0 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Çatlak ucunda oluşan maksimum gerilme hesaplanırken denklemdeki her bir sembol aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir;

$\sigma_{\max}$ : Çatlak ucundaki maksimum gerilme (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_0$ : Uygulanan çekme gerilmesi (N/mm<sup>2</sup>)  
a: Çatlak boyu (mm)  
 $\rho_t$ : Çatlak ucu eğrilik çapı (mm)

Çatlağın düz olması durumunda çatlak boyu (a), düz olmaması durumunda çatlak boyunun yarısı alınmıştır. Çatlak ucu eğrilik çapı ( $\rho_t$ ) doğal taşlarda 5 cm, asfalt örneğinde 2 cm ve beton örneğinde 3 cm olarak kabul edilmiştir.

### 3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRMELER

#### 3.1. Zemin Döşeme Malzemelerinin Kopma Enerjisi, Çarpma Dayanımı ve Kırılma Gerilmesi Analizi

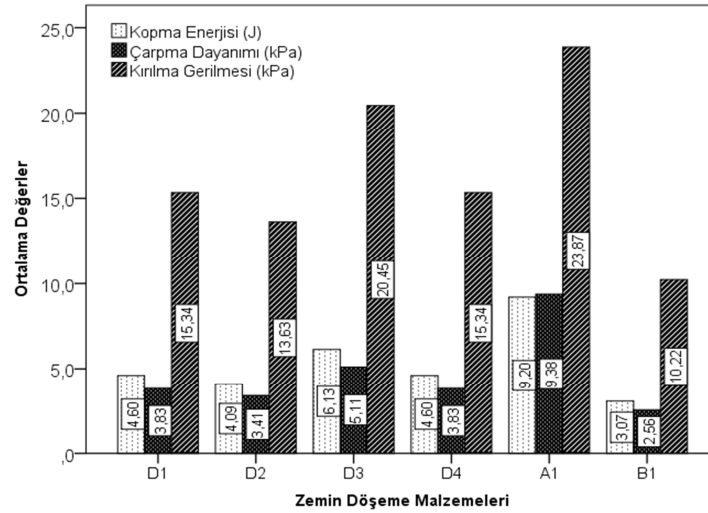
Çalışmada çarpma dayanımı deneylerinde kullanılan 6 farklı malzemenin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesi değerlerinin istatistiksel olarak analizi yapılmıştır.

Malzemelerin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesi (6 malzeme x 5 örnek) varyans (ANOVA) analizi uygulanmıştır. Zemin döşeme malzemelerin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesi bakımından  $p < 0.001$  anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı fark olduğu gözlemlenmiştir (Çizelge 2).

Malzemelerin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesine göre çarpma dayanımı değerleri Şekil 3'de verilmektedir.

**Çizelge 2.** Malzemelerin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesine göre istatistiksel analizi

Parametreler	Küme		Hata		F	Anlamlılık Düzeyi
	Ortalama Kare	df	Ortalama Kare	df		
Kopma Enerjisi(J)	38,624	3	0,034	26	1152,667	<0,001
Çarpma Dayanımı(kPa)	49,448	3	0,023	26	2126,998	<0,001
Kırılma Gerilmesi(kPa)	197,065	3	0,372	26	529,302	<0,001



**Şekil 3.** Malzemelerin kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesi değerleri

Zemin döşeme malzemelerinde beton (B1) örneği, kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesinde en düşük değerde olduğu görülmektedir. B1 örneği kopma enerjisi 3,07 J, çarpma dayanımı 2,56 kPa ve kırılma gerilmesi 10,22 kPa'dır. Buna göre (B1) örneği kırılma riski en yüksek değerdedir. Asfalt (A1) örneği, kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesinin en yüksek değerde olduğu görülmektedir. A1 örneği kopma enerjisi 9,2 J, çarpma dayanımı

9,38 kPa ve kırılma gerilmesi 23,87 kPa'dır. Buna göre (A1) örneği kırılma riski en düşük değerdedir.

Zemin döşeme malzemelerinde 4 farklı doğal taşlardan granit (D3) örneği diğer mermer (D1), bazalt (D2) ve kireçtaşı (D4) örneklerinden daha yüksek değer almışlardır. Bazalt (D2) örneği kopma enerjisi, çarpma dayanımı ve kırılma gerilmesi en düşük değer almıştır. Buna göre doğal taşlarda zemin döşeme malzemesi olarak granit tercih edilmelidir.

### 3.2. Zemin Döşeme Malzemelerinin Kırılma Potansiyeli İndeksinin Belirlenmesi ve Sınıflandırılması

istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile analiz edilerek, kırılma potansiyeli indeksi belirlenmiştir (Çizelge 3).

Zemin döşeme malzemeleri çarpma dayanımı, kopma enerjisi ve kırılma gerilmesi değerleri

**Çizelge 3.** Malzemelerin istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile kırılma potansiyeli indeksi

Çarpma Dayanımı (kPa)	Kopma Enerjisi (J)	Kırılma Gerilmesi (kPa)	Kırılma Potansiyeli İndeksi
<2,56	<3,07	<10,22	Çok Yüksek (ÇY)
2,56-3,69	3,08-4,43	10,23-14,77	Yüksek (Y)
3,69-5,11	4,43-6,14	14,78-20,45	Orta(O)
5,11-9,38	6,14-9,20	20,45-23,87	Düşük (D)
>9,38	>9,20	>23,87	Çok Düşük(ÇD)

Malzemelerin istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile kırılma potansiyeli

indeksi dikkate alınarak, sınıflandırması yapılmıştır (Çizelge 4).

**Çizelge 4.** Malzemelerin istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile kırılma potansiyeli indeksi göre sınıflandırılması

Zemin Döşeme Malzeme Kodu	Çarpma Dayanımı (kPa)	Kopma Enerjisi (J)	Kırılma Gerilmesi (kPa)	Kırılma Potansiyeli
D1	3,83	4,60	15,34	O
D2	3,41	4,09	13,63	O
D3	5,11	6,13	20,45	D
D4	3,83	4,60	15,33	O
A1	9,38	9,20	23,87	ÇD
B1	2,56	3,07	10,22	ÇY

Zemin döşeme malzemelerinden (B1) örneğinde; çarpma dayanımı 2,56 kPa, kopma enerjisi, 3,07 ve kırılma gerilmesi 10,22 kPa olduğu için kırılma potansiyeli çok yüksek seviyededir. A1 örneği; çarpma dayanımı 9,38 kPa, kopma enerjisi, 9,20 ve kırılma gerilmesi 23,87 kPa olduğu için kırılma potansiyeli çok düşük seviyededir. Kırılma potansiyeli sınıflandırmasına göre, beton (poroz beton) (B1) örnekleri hariç diğer örnekler zemin döşeme ve kaplama malzemesi olarak kullanılabilir olduğu öngörülmüştür.

## 4. SONUÇLAR

Yapılan bu deneysel çalışmalar sonucunda, zemin kaplama malzemesi olarak kullanılacak malzeme örneklerinin çarpma dayanımı, kopma enerjisi ve kırılma gerilmesi değerleri belirlenmiştir. Elde

edilen değerler kullanılarak, istatistiksel K ortalamalar kümeleme yöntemi ile kırılma potansiyeli indeksi belirlenmiş ve sınıflandırılmıştır. Aşağıda bu deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar özetlenmektedir:

- Zemin döşeme malzemelerinin çarpma dayanımı, kopma enerjisi ve kırılma gerilmesi bakımından  $p < 0,001$  anlamlılık düzeyinde tüm örneklerde istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre zemin kaplaması olarak kullanımında çarpma dayanımı, kopma enerjisi ve kırılma gerilmesinin etkili olduğu görülmektedir.
- Kırılma potansiyeli sınıflandırmasına göre; beton örnekleri hariç sırasıyla

asphalt, granit, kireçtaşı, mermer ve bazalt örneklerin; zemin döşeme malzemesi olarak kullanılabilir olduğu öngörülmüştür.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu araştırma çalışmasında kullanılan Beton (Poroz Beton) numuneler Yük. Müh. Adile MANCI'nın ve Asfalt numuneler Yük. Müh. Nur Erdem AKGÜL ŞEKER'in Yüksek Lisans tezlerinden üretmiş olduğu için kendilerine teşekkürlerimizi sunarız. Ayrıca deneylerin yapılmasında yardımcı olan, katkı sunan Lisans öğrencilerimiz, Ahmet Nur ALHAJ, Kusey ALYUSUF'da teşekkür ederiz. Araştırmamızdaki kullanılan verilerin üretilmesinde katkı sunan HÜBAP 19101, 19102 ve 17178 numaralı projelere de teşekkür ederiz.

## 6. KAYNAKLAR

1. Senturk, A., Gunduz, L., Tosun, Y.L., Sariisik, A., 1996. Marble Technology. Tugra Press, 242, Isparta.
2. Kulaksız, S., 2007. Natural Stone (Marble) Mining and Processing Technologies, TMMOB Chamber of Mining Engineers, 634, Ankara.
3. Sarıışık, A., 1998. Variation Characteristics in the Environment Interaction and Physico-Mechanic Properties of Calcium Carbonate Marbles, SDU, Ph.D. Thesis, 400, Isparta.
4. Sarıışık, A., Sariisik G., 2010. Quality Control of Turkish Calcareous Natural Stone Using the Merkont System, Journal of Testing and Evaluation, 38(5), 575-587.
5. Onargan, T., Köse, H., Deliormanlı, H., 2005. Mermer. TMMOB Press, 249.
6. Singh, T.N., Singh, S.K., Mishra, A., Singh, P.K., Singh, V.K., 1999. Effect of Acidic Water on Physico Mechanical Behaviour of Rock. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 6, 66-72.
7. Sharma, P.K., Khandelwal, M., Singh, T.N., 2007. Variation on Physico-mechanical Properties of Kota Stone Under Different Watery Environments. Building and Environment, 42, 4117-4123.
8. Sarıışık, A., Sariisik, G., Senturk, A., 2010. Characterization of Physical and Mechanical Properties of Natural Stones Affected by Ground Water Under Different Ambient Conditions, Ekoloji, 77, 88-96.
9. Sarıışık, A., Sariisik, G., 2011. Environmental Interaction Properties of Marble Used in the Restoration of Historical Monuments (Dalyan-Kaunos), Ekoloji, 79, 12-20.
10. Rodriguez-Navarro, C., Linares-Fernandez, L., Doehne, E., Sebastian-Pardo, E., 2002. Effects of Ferrocyanide Ions on NaCl Crystallization in Porous Stone. Journal of Crystal Growth, 243, 503-516.
11. Angı, O.S., 2007. Aksaray Yaylak Graniti'nin Kaplama Taşı Yönünden Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
12. Altınçekiç, H., 2001. Bazı Doğal Taşların İrdelenmesi ve Peyzaj Düzenlemelerinde Kullanım Olanakları, İ. Ü. Orman Fakültesi Dergisi, Seri: B, Cilt: 51, Sayı:1, İstanbul.
13. Uzun, G., 1996. Yapı Materyalleri, Ç. Ü. Ziraat Fakültesi, Genel Yayın No: 148, Ofset Atölyesi, Adana.
14. Kundak, E., 2016. Gerçek Mermerlerin Farklı Ortam Koşullarında Kopma Enerjisi ve Çarpma Dayanımının Belirlenmesi (Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
15. Sarıışık, G., 2012. Determining Performance of Marble Finished Products on Their Usage Areas by a New Impact-resistance Test Method, Journal of Testing and Evaluation, 40-5, 1-7.
16. Sarıışık, G., Kundak, E., Akdaş, H., Özkan, E., 2012. Mermer Plakalarda Çarpma Dayanımı Deneyi ve Sınıflandırılması, 8. Mermer ve Doğal Taş Kongresinde Sunulmuş Bildiri, Afyonkarahisar.
17. Sarıışık, G., Özkan, E., Kundak, E., Akdaş, H., 2016. Classification of Parameters Affecting Impact Resistance of Natural Stones, Journal of Testing and Evaluation, 44-4, 1650-1660.
18. Kundak, E., Akdaş, H., Sarıışık, G., 2020. Farklı Kalınlıktaki Bazı Doğal Taşların Kopma Enerjisi ve Çarpma Dayanımının Belirlenmesi.

- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(1), 62-72.
19. Mancı, A. 2019. Ponza Agregası ile Yeni Ürün Olarak Geliştirilen Yalıtım Plakasında Bor Atığı Kullanılarak Teknik Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisan Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
  20. Akgül Şeker, N.E., 2020. Bitümlü Sıcak Karışımların İklim Şartlarında Bozulmasına Filler Etkisinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisan Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
  21. TS EN 14158., 2004. Doğal Taş Deney Metotları-kopma Enerjisinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
  22. Alhaj A.N., Alyusuf, K., 2020. Yaya Yollarında Kullanılan Döşeme Malzemelerinin Dayanımının Karşılaştırılması (Çok Disiplinli Entegre Proje Çalışmaları), Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Şanlıurfa.

## Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi Yazım Kuralları

Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi mühendislik bilimlerindeki güncel bilimsel ve teknik gelişmeleri araştırmacılara ve mühendislere ulaştırmayı hedeflemektedir. Tüm mühendislik alanları ile ilgili teorik/deneysel ve uygulamaya yönelik çalışmalar Dergi'nin ilgi alanındadır. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi daha önce başka hiçbir yerde yayımlanmamış, özgün ve güncel bilimsel araştırma ve uygulamaları içeren makale ve kısa bildirimleri ile Dergi'de daha önce yayımlanmış makalelerle ilgili tartışmaları kabul etmektedir. Çeviri ve derleme makaleler kabul edilmemektedir. Makaleler Türkçe veya İngilizce olabilir. Dergi'ye gönderilen yazılar yayınlansın veya yayımlanmasın iade edilmez. Makaleleri yayınlama yetkisi dergi yayın kuruluna aittir.

Makalenin tamamı bilgisayar ortamında hazırlanmalı baskıya hazır biçimde iki adet (birisinde yazar adları ve adresleri olmamak üzere) **Dergi web sayfasında verilen örnek şablona uygun hazırlanmış olarak elektronik ortamda veya e-posta ekinde gönderilmelidir.**

Makale, A4 (210x297 mm) boyutlu kağıda, Windows uyumlu Word ortamında, Times New Roman font kullanılarak, birer aralıkla yazılmalı, ana başlıklar 12 Punto (koyu), yazar adları 12 Punto (koyu), alt başlıklar ve metin 10 punto olmalıdır.

Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 15 sayfadan, kısa bildirimler 4 sayfadan daha uzun olmamalıdır. **Makale Türkçe ise: Türkçe Başlık, İngilizce Başlık, Öz, Anahtar Kelimeler, Abstract** (İngilizce öz), **Keywords, Metin, Semboller** (gerekliyse), **Teşekkür** (gerekliyse) ve **Kaynaklar,**

**Makale İngilizce ise: İngilizce Başlık, Türkçe Başlık, Abstract, Keywords, Öz** (Türkçe öz), **Anahtar Kelimeler, Text, Notations** (gerekliyse), **Acknowledgments** (gerekliyse) ve **References** sırası içinde düzenlenmelidir.

**Başlık** kısa ve açık olmalı, içeriği yansıtılabilmelidir. **Öz** (ve **Abstract**) çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 150 kelimeyi aşmamalıdır. En az üç, en fazla beş tane anahtar kelime verilmelidir. Başlık, Öz ve İngilizce başlıklı Abstract birinci sayfaya sığdırılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır. **Metin** yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, makale Türkçe ise Türkçe, makale İngilizce ise İngilizce yazım kurallarına uygun olmalıdır.

Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalıdır. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, her birine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.

Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, makalenin (bildirinin veya kitabın) tam başlığı; **Makale ise:**, derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları, yıl. **Kitap ise:** cilt numarası, varsa editörü, yayımlandığı yer, yayımlandığı yıl. **Bildiri ise:** konferansın adı, yapıldığı yer, yıl. **Elektronik ortamdan alınmış ise:** Bildiri sadece CD/DVD'de yayınlanmış ise: Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, bildirinin adı, konferansın adı (CD/DVD), yapıldığı yer, yıl. "Konferansın adından hemen sonra parantez içerisinde CD/DVD olduğu belirtilecektir." **Tez ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi, tezin adı, derecesi, sunulduğu kurum, yıl. **Rapor ise:** Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, raporun adı, türü, numarası, kuruluşun adı, yayımlandığı yer, yıl. **Web Sitesi ise:** Yazar(lar) belli ise; yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), gün, ay, yıl olarak alıntı tarihi, varsa yayımlandığı yıl. **Kurum/Kuruluşlara ait ise:** Kurum adı, yazının başlığı, web adresi (<http://www.xxxxx.xxx.xxx>), gün, ay, yıl olarak alıntı tarihi, varsa yayımlandığı yıl. **Elektronik kitap/rapor ise:** Yazar(lar)ın soyadı, adının baş harfi veya kitap/raporu yayımlayan kurum veya kuruluşun adı, gün, ay, yıl olarak alıntı tarihi, varsa yayımlandığı yıl.

### Dergi İletişim Adresleri

Çukurova Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergi Yayın Kurulu Başkanlığı 01330 ADANA

E-posta: mmfdergi@cu.edu.tr  
Tel: (322) 3387050

cu.mmfdergi@gmail.com  
Faks: (322) 3386126

